

**Morphometrische Wurzeluntersuchungen
in Fichtenreinbeständen
und in Mischbeständen von Fichte und Erle**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg i. Br.

vorgelegt von
Sabah Saleim Al-Kawaz
aus Baghdad – Irak

1978

**Morphometrische Wurzeluntersuchungen
in Fichtenreinbeständen
und in Mischbeständen von Fichte und Erle**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg i. Br.**

**vorgelegt von
Sabah Saleim Al-Kawaz
aus Baghdad – Irak**

1978

Dekan: Professor Dr. H. Braun
Leiter der Arbeit: Professor Dr. J. Barner
Referent: Professor Dr. J. Barner
Korreferent: Professor Dr. Dr. h.c. M. Prodan

Tag der Verkündigung

des Prüfungsergebnisses: Juni 1978



Vorwort

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. J. Barner, möchte ich sehr herzlich für die Überlassung des Themas, sowie für die vielseitigen Anregungen und Unterstützungen bei der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit danken.

Gleichfalls darf ich Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. M. Prodan für seine freundliche Unterstützung danken.-

Dem Ministerium für Hochschulwesen und Wissenschaftliche Forschung in Baghdad (Irak) danke ich für die Abordnung zu meiner vertieften beruflichen Ausbildung, die damit verbundenen ständigen Unterstützungen, sowie für die Finanzierung der vorliegenden Dissertation.-

Mein Dank gilt auch besonders für Herrn Dr. A. Gahnem für die durchgeführten Bodenuntersuchungen.-

Mein ganz besonderer Dank gilt weiterhin Herrn E. Zähringer von der Forschungsstelle für Experimentelle Landschaftsökologie für seine stets bereitwillige, großzügige Hilfe bei den Außenaufnahmen auf der Freifeldprüfanlage.-

Frau S. Limberger und Fräulein Ch. Marx danke ich sehr für die sorgfältige Reinschrift der Arbeit.-

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner lieben Frau Nada für ihre Unterstützung und all ihre Hilfe, damit es mir stets möglich war, die vorliegende Untersuchung in Ruhe und ohne Sorgen durchführen zu können.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550803_0045

Inhalt

	<u>Seite</u>
I. Einleitung	1
II. Material und Methode	7
1. Die Beschreibung der Untersuchungsstandorte und der Versuchsanlage	7
A. Untersuchungsstandorte	7
B. Anlage der Versuche und Beschreibung des Pflanzenmaterials	18
2. Das methodische Vorgehen am Untersuchungsort	21
A. Nach der Plexiglasplattenmethode nach BARNER	26
a) Wurzelschwerpunkt (WS)	29
b) Die Summenkurve der Wurzeldurch- messer (SkWd)	29
c) Summenkurven der Wurzeltiefen (SkWt)	30
d) Die Wurzeldichte (WD)	30
e) Wurzelabstandssumme (WAs)	30
f) Der Wurzelausnützungsgrad (WAGr)	30
g) Der prozentuale Feinwurzelanteil ver- gleichsweise zu allen anderen Wurzeln mit einem Wurzeldurchmesser von über 1,5 mm	31
h) Wurzelkreisfläche (WKfl)	31
B. Nach der neu entwickelten Kastenmethode als methodische Kombination zwischen Plexiglasplattenmethode nach BARNER und der Blockmethode nach GROSSKOPF	48
a) Wurzelzahl (WZ)	53
b) Wurzeldurchmesser (W ϕ)	55
c) Wurzellänge (WL)	55

d) Wurzeltrockengewicht (WG)	56
e) Wurzelvolumen (WV)	56
f) Wurzelausnützungsgrad (WAG)	57
g) Wurzeldichte (WD)	58
h) Mykorrhizengewicht (WMG)	58
i) Vergleich zwischen dem Wurzelvolumen und dem Volumen des oberirdischen Sproßachsensystems	58
k) Feinwurzelintensität (FWI)	59
l) Wurzeldurchdringungsgrad, bzw. Über- kreuzungshäufigkeit der Wurzeln inner- halb der einzelnen Bodentiefenstufen (WDDG)	59

III. Darstellung der Befunde 61

1. Die mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode nach BARNER erhobenen Wurzelbefunde an den Fichten	61
A. Wurzelschwerpunkt (WS)	61
B. Summenkurve der Wurzeldurchmesser (SkWd)	70
C. Summenkurve der Wurzeltiefen (SkWt)	72
D. Wurzeldichte (WD) und Wurzelabstandssumme (WAs)	73
E. Wurzelausnützungsgrad (WAG)	80
F. Prozentualer Anteil der Feinwurzeln ver- gleichsweise zu dem Wurzelanteil aller anderen Wurzeln	82
G. Wurzelkreisfläche (WKfl)	84
2. Die mit Hilfe der Kastenmethode erhobenen Wurzelbefunde an den Fichten und Erlen	86
A. Wurzelzahl (Gesamtwurzelzahl, GWZ, und Feinwurzelzahl, FWZ)	86

B. Wurzeldurchmesser ($W\phi$)	91
C. Wurzellängen (WL)	93
D. Wurzelrockengewicht (WG)	96
E. Wurzelvolumen (WV)	100
F. Wurzelausnützungsgrad (WAG)	102
G. Wurzeldichte (WD)	105
H. Mykorrhizengewichte (WMG)	109
I. Wurzeldurchdringungsgrad (WddG)	113
3. Die Vergleichsbefunde zwischen dem Wurzelvolumen der Fichten und Erlen und dem Volumen ihrer oberirdischen Sproßachsensysteme	117
4. Vergleichsbefunde von Fichtenwurzelkriterien, die nach den Versuchsanordnungen mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode nach BARNER und der Kastenmethode erhoben worden sind	123
A. Im Hinblick auf die Wurzelzahl	124
B. Im Hinblick auf den Wurzelausnützungsgrad	124
C. Im Hinblick auf die Wurzeldurchmesser	127
D. Im Hinblick auf die Wurzeltiefe	129
5. Die nach BARNER und GROSSKOPF mit Hilfe der Kastenmethode bestimmten Feinwurzelintensitäten	133
6. Synoptischer Vergleich der wichtigsten wurzelmorphometrischen Befunde von Fichte und Erle mit Hilfe der Darstellung von Stufenkoordinatensystemen	141
IV. Besprechung der Ergebnisse	147
V. Zusammenfassung der Ergebnisse	163
VI. Angeführte und benützte Literatur	

I. Einleitung

Die Frage des Mischanbaus zwischen ertragreichen Nadelholzarten und weniger ertragreichen Laubholzarten beschäftigt die ältere und neuere Waldbauliteratur und wurde insbesondere in dem Waldbaubuch von GEYER vom Jahre 1886 behandelt. GEYER (1886) hatte bereits zu seiner Zeit aufgrund eigener Beobachtungsergebnisse darauf hingewiesen, daß die Vitalität mancher Hauptholzarten durch geeignete Mischung mit einer geeigneten Laubmischholzart wesentlich gesteigert werden könnte und daß die gleichen Hauptholzarten weniger wüchsig aufwachsen würden, wenn sie nicht mit derartigen Laubmischholzarten gemischt wären.

Seit der Zeit von GEYER (1886) gab es eine Vielzahl gleich- und ähnlich lautender Hinweise, nicht nur auf waldbaulichem, sondern auch auf nichtwaldbaulichem Gebiet, so u.a. in dem grundlegenden Werk von MOLISCH (1937), das folgenden Titel trägt: "Der Einfluß einer Pflanze auf die andere", ein Einfluß, welchen er als erster mit dem Ausdruck "Allelopathie" belegt hatte.

Es gibt eine Vielzahl forstlicher Autoren, die sich beobachtend und untersuchend mit dem Allelopathie-Problem befaßt hatten, von denen aus älterer Zeit WIEDEMANN (1950) angeführt werden kann, der in seinem Werk über "Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft" darauf hingewiesen hatte, daß eine Nadelholzart in ihrer Vitalität ganz wesentlich gesteigert werden kann, wenn sie von einer Mischholzart begleitet ist, die zu den Mykorrhizenbildnern, wie z.B. der Erle (*Alnus glutinosa*), zählt.

In späterer Zeit hatte über die bis zu diesem Zeitpunkt gemachten Erfahrungen und Beobachtungen RÖHRIG (1964) ein Sammelreferat über die gegenseitige Beeinflussung der höheren Pflanzten aus der Sicht des Waldbaus veröffentlicht, dem im Jahre 1968 eine Veröffentlichung von BARNER und MIKLAVZIC folgte, die sich speziell mit Erfahrungen und Beobachtungen des Mischanbaus zwischen Fichte und Erle in Slowenien befaßte, in der u.a. mitgeteilt worden ist, daß die durch die Erle erfolgende Vitalisierung, insbesondere nach ökologischer Belastung, in auffallender Weise zu erkennen ist (so u.a. nach Überflutung der von BARNER und MIKLAVZIC 1968 angelegten Versuchskulturen durch den Fluß Ljubljanka in der Nähe von Ljubljana), wonach nach Rückgang dieser Überflutung es sich herausstellte, daß die Mischanbauparzellen aus Fichte mit Erle ein wesentlich vitaleres Aussehen erkennen ließen als die Reinanbauparzellen, die allein aus Fichte bestanden.

Dieses Ergebnis gab HASSAN (1976) die Veranlassung, die von BARNER und MIKLAVZIC durchgeführten Versuchsanstellungen zu reproduzieren, indem er systematisch auf allen fünf Prüffeldern der Freifeldprüfanlage der Forschungsstelle für Experimentelle Landschaftsökologie der Universität Freiburg Versuchskulturen von Fichtenreinbeständen und Fichten-Erlen-Mischbeständen angelegt hatte.

Die Untersuchung von HASSAN (1976) hat im wesentlichen die Ergebnisse von BARNER und MIKLAVZIC (1968) bestätigt. Er konnte mitteilen, daß auf allen Prüffeldern die Organe der Fichten im Mischbestand mit Erle signifikant stärker als die der von Fichtenreinbeständen stammenden Fichten ausgebildet worden sind, wobei der Vorsprung in der Organentwicklung der Fichtenmischbestände gegenüber den Fichtenreinbeständen umso stärker zum Ausdruck kam, je günstiger die Standortverhält-

nisse auf den Prüffeldern waren.

Das Problem der Organentwicklung von Mischbeständen zwischen Fichte und Erle ist so vielseitig, daß außer BARNER und MIKLAV-ZIC (1968) und HASSAN (1976) in neuester Zeit auch LEIBUNDGUT (1976) sich mit ihm befaßt hatte, als er im Forstlehrgarten Waldegg in der Schweiz Untersuchungen über die gegenseitige Beeinflussung verschiedener Baumarten vorgenommen hatte.

Im Gegensatz zu den Versuchen von HASSAN (1976) bestand seine Versuchsanstellung weniger in einem Vergleichsanbau auf ökologisch unterschiedlich ausgestalteten Prüffeldern, als vielmehr in sogenannten Kulturtöpfen angelegten "Wettbewerbsversuchen", indem er auf verhältnismäßig engem Raum u.a. in ein- und dieselben Kulturtöpfe gleichermaßen Fichten und Erlen einpflanzte. Außerdem führte er Parallelversuche in ähnlicher Weise wie HASSAN (1976) auf Versuchsparzellen durch, indem er Mischanbauten von Fichten und Erlen anlegte und kam zum Ergebnis, daß die vitalisierende Wirkung der Erle auf die Fichte dadurch zum Ausdruck kam, daß vergleichsweise zum Kontrollversuch (Anbau Fichte mit Fichte) eine Höhenmehrleistung von 7 % erreicht worden ist. Dies entspricht durchaus auch den Ergebnissen von HASSAN (1976), der nicht nur auf sämtlichen fünf Prüffeldern der Freifeldprüfanlage eine allgemeine Höhenwuchsmehrleistung bei der Fichte bei Mischanbauten mit Erlen gefunden hatte, sondern auch feldspezifische Höhenwuchsmehrleistungen jeweils auf dem Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld der Freifeldprüfanlage, wobei der Höhenwuchsunterschied bei Mischanbauten von Fichte mit Erle im Vergleich zu Fichtenreinbeständen umso höher war, je ökologisch besser das Untersuchungsfeld ausgestaltet war.

Dieser Höhenwuchsunterschied blieb auch dann erhalten, nachdem

die Pflanzen aus den Prüffeldern herausgenommen und auf ein der Freifeldprüfanlage benachbartes Gelände verschult worden sind.

Sowohl BARNER und MIKLAVZIC (1968) und HASSAN (1976) einerseits, als auch LEIBUNDGUT (1976) hatten jedoch keine Wurzeluntersuchungen durchgeführt und Näheres über die bei Mischanbauten erzielte Wurzelmorphologie mitgeteilt. Da sich in den seitherigen Veröffentlichungen lediglich Vitalitätsunterschiede bei Fichtenreinbeständen und Mischbeständen mit Fichte und Erle ergeben hatten, interessieren nunmehr auch möglicherweise bestehende Organunterschiede im Bereich des Wurzelsystems.

Die vorliegende Arbeit hatte es sich zur Aufgabe gemacht, diese Kenntnislücke zu schließen und befaßte sich ausschließlich mit der Wurzelorganausbildung von Fichtenreinbeständen und Mischbeständen von Fichte und Erle.

Weil diese Organunterschiede in allen Einzelheiten untersucht werden mußten, war die Anwendung solcher Wurzelbestimmungsmethoden von Nöten, die zählend, messend und trockengewichtswiegend vorgingen. Die von uns angewandten Wurzelbestimmungsmethoden sollten es uns auch zusätzlich möglich machen, zu gleichen Einsichten zu gelangen, wie dies in der Literatur mitgeteilte und früher angewandte Wurzelbestimmungsmethoden möglich gemacht haben.

So konnte uns in methodischer Hinsicht die von GROßKOPF vom Jahre 1950 über die Bestimmung der charakteristischen Feinwurzelintensitäten in ungünstigen Waldböden und Profilen und

ihre ökologische Auswertung dienen, auf der dann später ZETTEL (1971) seine Dissertation aufbaute, der sich mit einem methodischen Vergleich der Baumwurzelverfassung nach GROßKOPF (1950) und BARNER (1965), durchgeführt in Fichtenbeständen im Bereich verschiedener Standorteinheiten des nördlichen Oberschwabens, befaßt hatte. So bot sich uns die Möglichkeit, in methodischer Hinsicht auf die ältere Arbeit von GROßKOPF (1950), eine spätere Arbeit von BARNER (1965) und die ausgeprägt methodisch ausgerichtete Arbeit von ZETTEL (1971) zurückzugreifen.

Doch alle in der Literatur mitgeteilten Wurzelbestimmungsmethoden, auch diejenigen, die außer den Arbeiten GROßKOPF (1950), BARNER (1965) und ZETTEL (1971) mitgeteilt worden sind, waren mehr oder weniger an ihr jeweiliges Untersuchungsobjekt angepaßt. Die o.g. Autoren setzen sich durchgehend mit Beständen im Baumholzalter auseinander. Unsere Untersuchungsbestände hingegen, die früher von HASSAN (1976) untersucht worden sind, sind Jungwuchsbestände im entsprechenden Engstand mit vergleichsweise zu Altbeständen kleiner dimensionierten Wurzeln. Sowohl der Engstand (es handelte sich um einen Pflanzgrundverband von 40 x 40 cm) als auch die relativ geringen Wurzeldimensionen verlangten von uns ein methodisches Vorgehen, das in dieser Art und Weise bisher in der Literatur noch nicht zur Anwendung gekommen ist. Zu diesem methodischen Vorgehen wurden wir umso mehr veranlaßt, als es uns darum ging, den spezifischen Wechselbeziehungen des Wurzelwachstums von Fichte und Erle in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft nachzuspüren. Dieses methodische Vorgehen wird im darauffolgenden Kapitel über Material und Methode noch näher erläutert werden. Es ging uns aber im Verlauf der Bearbeitung unserer Fragestellung nicht nur darum, allein dieses methodische Vorgehen auszuführen, sondern auch die Ergebnisse unseres methodischen Vorgehens mit demjenigen früherer Autoren, so u.a. mit dem von

AKSOY (1965), BARNER (1965), BERGEMANN (1955), BIBELRIETHER (1960, 1962, 1963, 1964), BÜSGEN (1897, 1917), BURCKHARDT (1870), EHWALD (1948, 1950, 1963), EHWALD, BUCHHOLZ, NEUMANN und VETTERLEN (1963), EIDMANN (1943), FEHRENBACH und ALEXANDER (1955), GAYER (1880, 1886), GLATZEL (1964), GROßKOPF (1950), GROTH (1927), HAUSDÖRFER (1957), HEIKURAINEN (1957, 1958, 1961), HENGST (1958), HILF (1927), HOCHTANNER und SEITSCHKE (1964), HOLMSGAARD und SCHARFF (1963), HOLSTENER und JØRGENSEN (1958), HOUGH, WOODS und McCORMACK (1965), JOACHIM (1953), KALELA (1942, 1950, 1954, 1958), KELLEY, HARDMAN und JENNINGS (1947), KÖNIG (1849), KÖSTLER (1956, 1962), KÖSTLER, BRÜCKNER und BIBELRIETHER (1968), KÖSTLER und SOMMER (1962), KRAUSS (1926), KRAUSS und Mitarbeiter (1934, 1935, 1939), KRAUSS und MOOSMAYER (1953), KREUTZER (1961), von KRUEDENER (1943, 1951), LADEFEGED (1939), LAITAKARI (1927), LEMKE (1956), LIESE (1926), LINNEMANN (1964), LYR und HOFFMANN (1965), McVEAN (1956), MELZER (1962, 1963, 1964), MEYER (1962), MOLL (1961), KERN, MOLL und BRAUN (1961), MÜLLER (1928), NOBBE (1875), OKSBJERG (1958), PRIEHÄUSER (1939), RACHTEJENKO (1952), REED (1939), RÖHRIG (1958), SACHS (1874), SCHMIDT-VOGT (1961), SCHULTZ und BISWELL (1955), SINGER und HUTNIK (1965), STEVENS (1931), TOLSKI (1904), VATER (1927), WAGENHOFF (1938), WAGENKNECHT (1955, 1960), WEBER (1953), WIEDEMANN (1927), WILDE und Mitarbeiter (1952) zu vergleichen.

II. Material und Methode

1. Die Beschreibung der Untersuchungsstand- orte und der Versuchsanlage

A. Untersuchungsstandorte

Die Untersuchungen wurden auf den Prüffeldern der Forschungsstelle für Experimentelle Landschaftsökologie der Universität Freiburg i.Br. in dem in der Nähe von Freiburg gelegenen Bohreratal durchgeführt, die im folgenden näher beschrieben werden.

Die kennzeichnenden Einzelheiten des Freifeldprüfanlagen-
geländes sind folgende: Es liegt auf der Westseite des südlich
von Freiburg gelegenen Bohreratales in einer Höhe von 390 m
über NN. In dem in der Talaue befindlichen Gelände liegen
junge umlagerte Schottermassen, die von einer mehr oder minder
mächtigen Auewaldlehmdecke überdeckt sind. Der Gelände-
horizont ist von verschiedenen hohen Bergkämmen umgeben, wobei die Ent-
fernung von Bergkamm zu Bergkamm der quer über das Tal ver-
laufenden Linie 1500 m beträgt. Die Talsohle ist in der Mitte
des Versuchsgeländes 300 m breit. Infolge der Tallage bildete
sich ein spezielles Klima heraus, das durch verhältnismäßig
hohe Luftfeuchtigkeit gekennzeichnet ist.

Die Horizonteinschränkung des Tales durch die umgebenden Berge
führt zu einer Reduzierung der Sonnenscheindauer im Vergleich
zu der nichthorizonteingeschränkten Station des Wetteramtes
Freiburg i.Br.. Im Vergleich zu dieser Wetterstation ergibt
sich im 25jährigen Mittel eine Sonnenscheindauerreduktion von
ca. 35 %.

Die Temperaturdifferenzen zwischen der Wetterstation Freiburg und dem Versuchsgelände der Freifeldprüfanlage sind von AL-SARAF (1973) und HOERNSTEIN (1977) im Zeitraum von 4 Jahren untersucht worden und hatten im Mittel $1,9^{\circ}\text{C}$ betragen. Um diese Grade ist also das Versuchsgelände kühler als die Temperatur der Station des Wetteramtes Freiburg i.Br.

Was die Windverhältnisse betrifft, so gilt für das Versuchsgelände der Freifeldprüfanlage der allgemein für Tallagen charakteristische Talwind-Bergwind-Zyklus. Da der Talverlauf an jener Stelle, wo sich die Versuchsflächen der Prüffelder befinden, in nordsüdlicher Richtung liegt, erhalten die Versuchsflächen ihren Wind hauptsächlich aus den beiden Windrichtungen Nord und Süd.

Die Konstruktionseinzelheiten der Freifeldprüfanlage sind folgende: Sie besteht aus einem Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld, Steinfeld. Das Feuchtfeld ist ein von Gräben umgebenes Hochbeet, dessen Außenböschungen höher liegen als der Beetkörper selbst. Das mit Hilfe eines Kanalsystems einstaubare Wasser kann je nach Stauwehreinrichtung in beliebigen Höhen gehalten werden und damit entsprechend den Feldkörper befeuchten. Infolgedessen konnten wir mit Hilfe dieses Kanalsystems feuchte Bodenverhältnisse zur Darstellung bringen.

Das Naßfeld ist ein von Böschungen umgebenes Prüffeld, das durch das Feldkanalstauwehrsystm einen Wassereinstau bis zu einer Höhe von 60 cm Überflutung erhalten kann. Ist nach einem erfolgten Einstau das Ausgangsstauwehr vollkommen geschlossen, so kann damit ein überfluteter Standort mit stagnierender Staunässe im Boden erzeugt werden. Erhält jedoch das Ausgangsstauwehr eine lichte Öffnung und gerät das Überflutungswasser in Bewegung, so kann ein wasserbewegter Überflutungsstandort entstehen.

Das Normalfeld weist vergleichsweise zu allen übrigen Prüffeldern mittlere Bodenfeuchtigkeitsverhältnisse auf. Es ist ein Hochbeet, das aber im Gegensatz zu den Hochbeeten des Steinfeldes und Sandfeldes, die sogleich beschrieben werden, nicht mit einem fremden Bodensubstrat aufgeschüttet worden ist, sondern mit dem Bodensubstrat des örtlich auf dem Versuchsgelände vorgefundenen gewachsenen Bodens.

Das Sandbeet ist ebenfalls ein Hochbeet wie das Normalfeld. Doch dieses Hochbeet ist mit fremden Sandmaterial aus der Rheinebene aufgeschüttet. Das aufgeworfene Material ist jedoch nicht so trocken, wie das sogleich zu besprechende Steinfeld, weil in das Feld kein Drainagenetz eingebaut ist.

Das Steinfeld ist ebenfalls wie das soeben beschriebene Sandfeld und Normalfeld ein aufgeschüttetes Hochbeet, das mit einem von der Rheinebene herbeigeführten Kiesmaterial aufgeschüttet worden ist. Es ist einmal durch eine Steinsickerung trockengelegt, die das Feld von dem anliegenden Berghang abtrennt, so daß kein Hangwasser in dieses Feld eindringen kann. Außerdem wurde durch Einlegen eines Drainagenetzes für zusätzliche Bodentrockenheit gesorgt, so daß auf ihm die stärkste Bodentrockenheit der gesamten Prüffeldserie vorherrscht.

HASSAN (1976) hatte in den Jahren von 1974 bis 1976 systematische Bodenfeuchtigkeitsbestimmungen mit Hilfe der gravimetrischen Bodenfeuchtigkeitsbestimmungsmethode durchgeführt und seine Ergebnisse in Form von relativen Häufigkeitsverteilungen gem. der Abb. 1 zur Darstellung gebracht.

Man erkennt aus seiner Darstellung einen guten Vergleich der statistisch häufigsten Bodenfeuchtigkeitswerte der einzelnen Prüffelder. Die Skala beginnt mit den trockensten Werten des Steinfeldes und verläuft dann weiter über das Sandfeld, Nor-

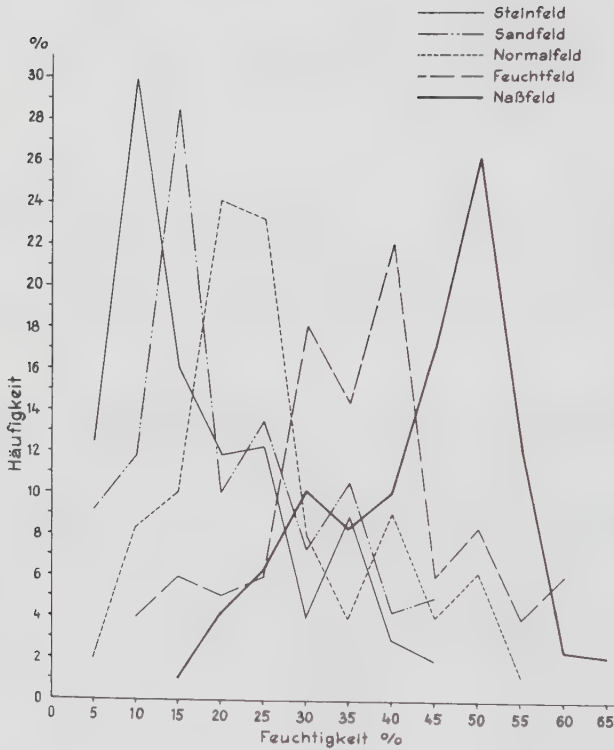


Abb. 1: Darstellung der relativen Häufigkeitsverteilungen der mittels der gravimetrischen Bodenfeuchtigkeitsbestimmungsmethode ermittelten Bodenfeuchtigkeitsgewichtsprozent der fünf Prüffelder der Freifeldprüfanlage (nach HASSAN, 1976)

malfeld bis zum Feuchtfeld und Naßfeld.

Inwieweit die Feuchtigkeitswerte der einzelnen Tabellen statistisch unterschieden werden können, ist aus der statistischen Prüfungstabelle (Tab. 1) zu ersehen, woraus zu erkennen ist, daß alle 5 Prüffelder im Hinblick auf ihre Bodenfeuchtigkeit signifikant verschieden sind.

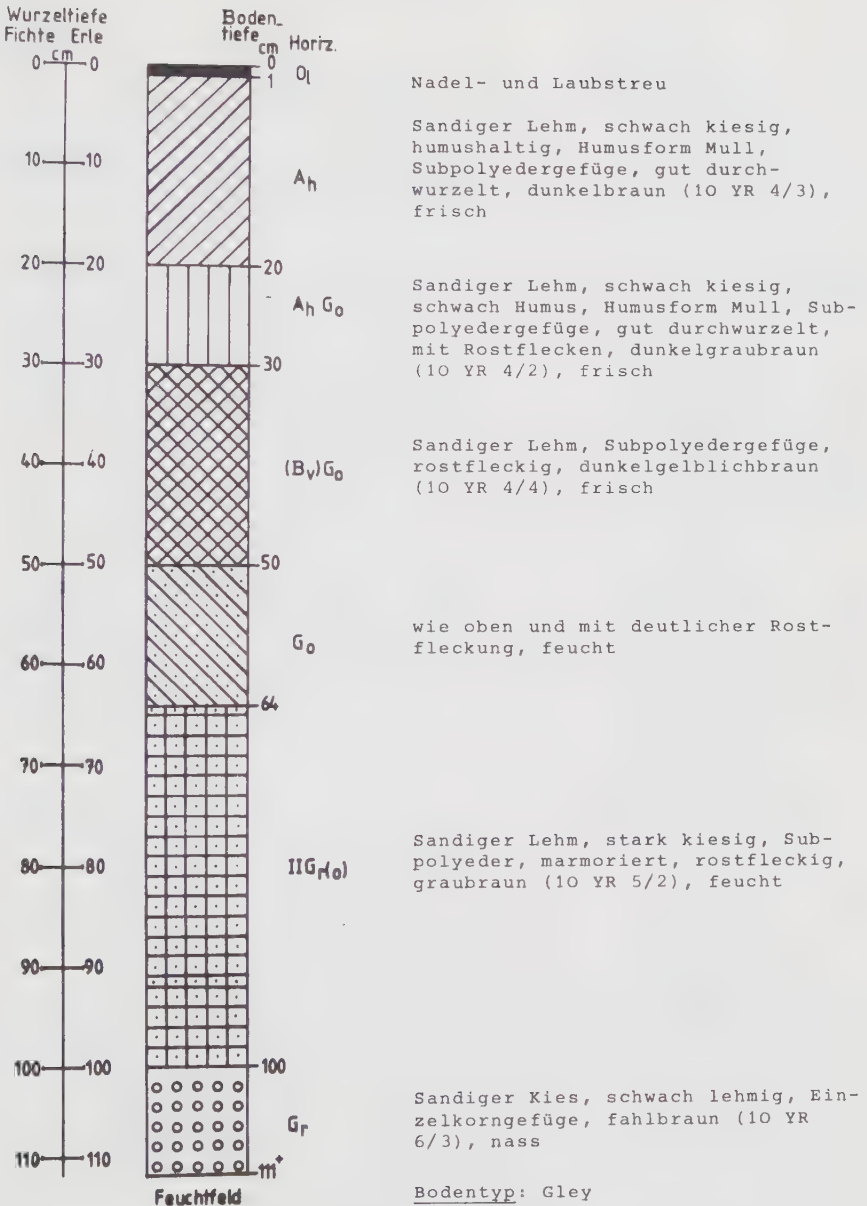
Zur Standorterkundung der Prüffelder wurden bereits für die Arbeit von HASSAN (1976) seitens des Bodenkundlichen Instituts der Universität Freiburg Bodenaufnahmen durch die Herren Akademischer Oberrat Dr. HÄDRICH und Wissenschaftlicher Assistent Dr. STAHR im Jahre 1975 durchgeführt. Es ging uns nun darum, am genauen Ort, wo wir unsere morphometrischen Wurzeluntersuchungen, bzw. die höhensektionsweise Herauspräparierung unserer Wurzeln vornahmen, nochmals die genaue Höhenlage der einzelnen Bodenhorizonte zu überprüfen. Diese Überprüfung unternahm Herr Dr. CHANEM im Jahre 1977, der zu den gleichen Profilbeschreibungsergebnissen kam wie diejenigen von Dr. HÄDRICH und Dr. STAHR im Jahre 1975, wobei sich bei der erneuten Profilbeschreibung lediglich die Höhenlage der Bodenhorizonte verschob, weil die von Dr. GHANEM untersuchten Bodenprofile an einer anderen Stelle des jeweiligen Prüffeldkörpers lagen als die von Dr. HÄDRICH und Dr. STAHR beschriebenen.

Die revidierten Profilbeschreibungen sind folgende:

	Stein- feld	Sand- feld	Normal- feld	Nass- feld	Feucht- feld
Steinfeld	x	-	-	-	-
Sandfeld	-	x	-	-	-
Normalfeld	-	-	x	-	-
Nassfeld	-	-	-	x	-
Feuchtfeld	-	-	-	-	x

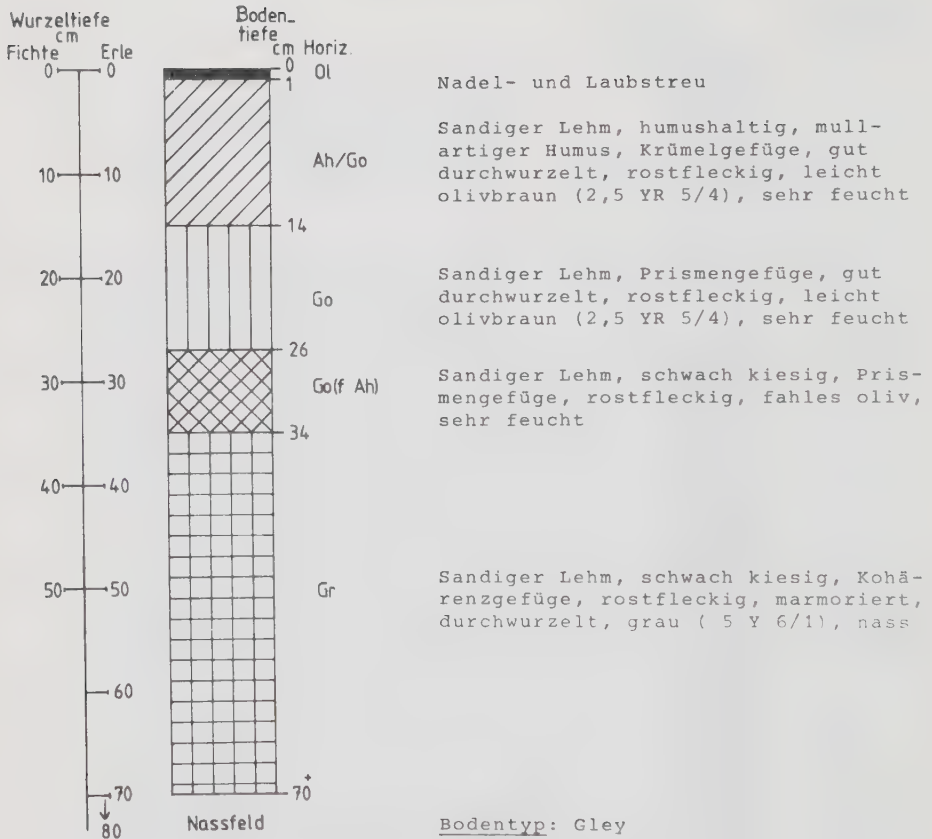
Tab. 1: Mit Hilfe des t-Testes vorgenommene statistische Überprüfung der Bodenfeuchtigkeitsunterschiede auf den fünf Prüffeldern der Freifeldprüfanlage

Feuchtfeld



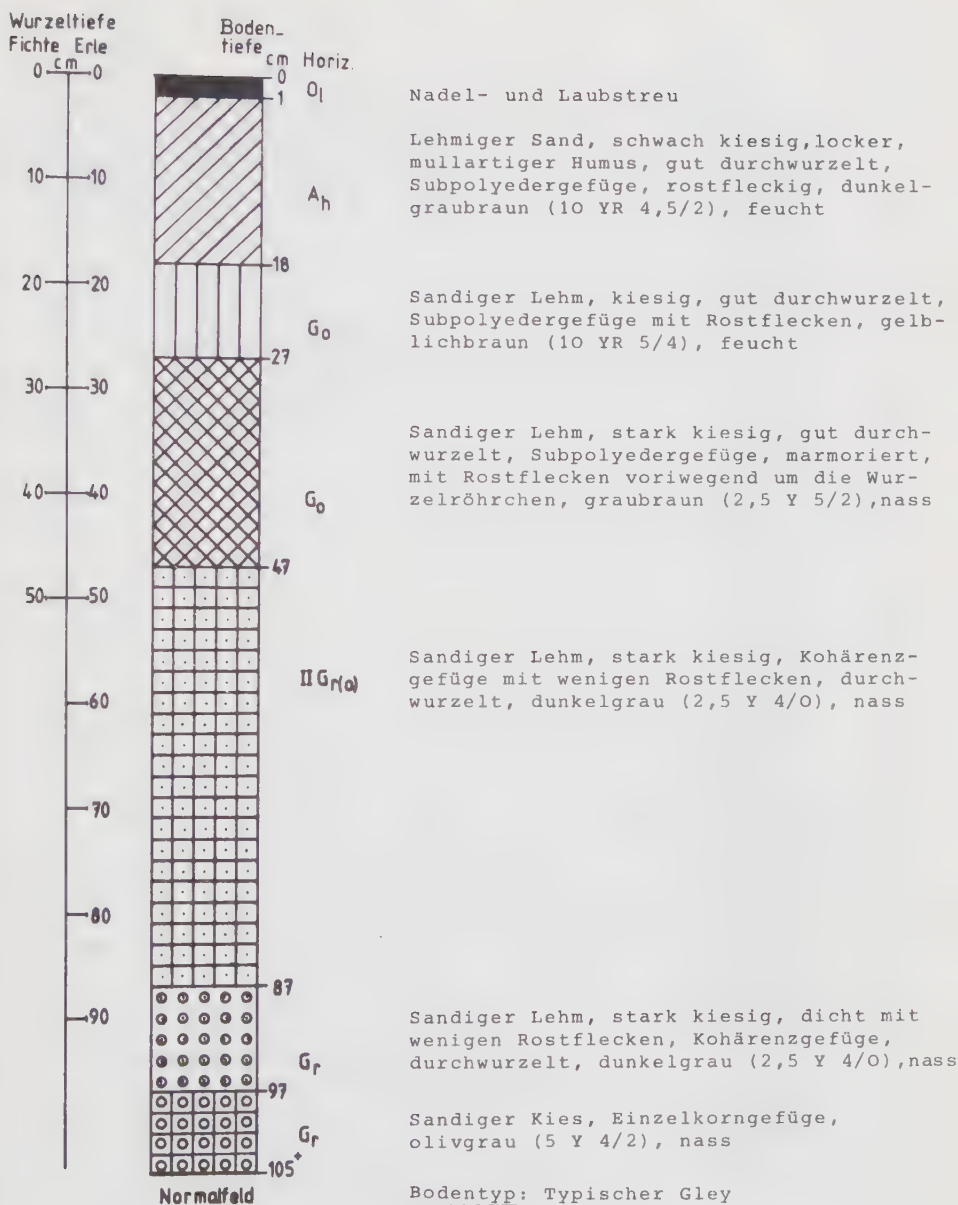
Es handelt sich auch um ein Zweischichtprofil wie beim Normalfeld. Das Grundwasser ist bei 100 cm. Die physiologische Gründigkeit (Durchwurzelbarkeit) bis 150 cm. Die Durchwurzelung bis 118 cm. Die Hauptwurzelzone bis 90 cm.

Naßfeld



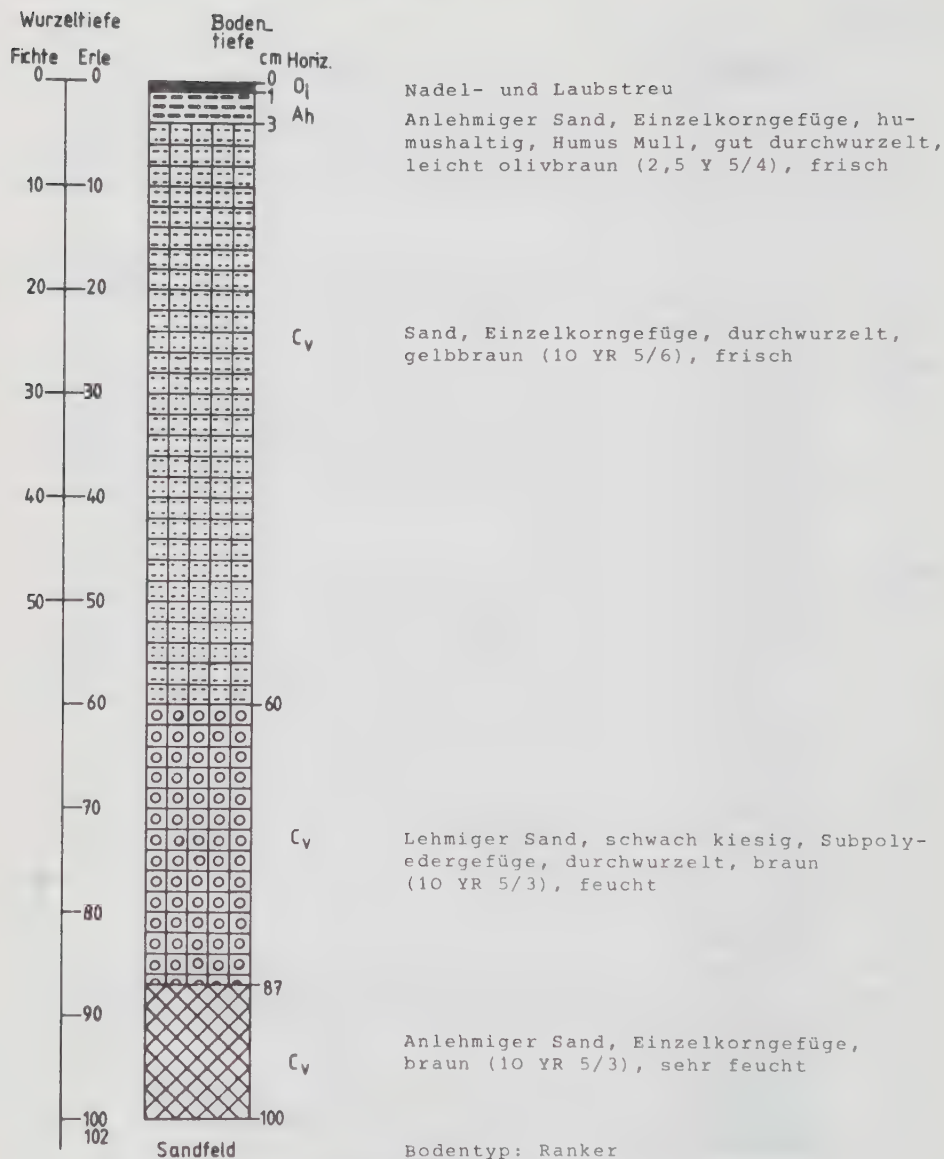
Entwicklungstiefe 45 cm. Physiologische Gründigkeit (Durchwurzelbarkeit) > 100 cm. Durchwurzelungstiefe 80 cm. Hauptwurzelzone 70 cm.

Normalfeld



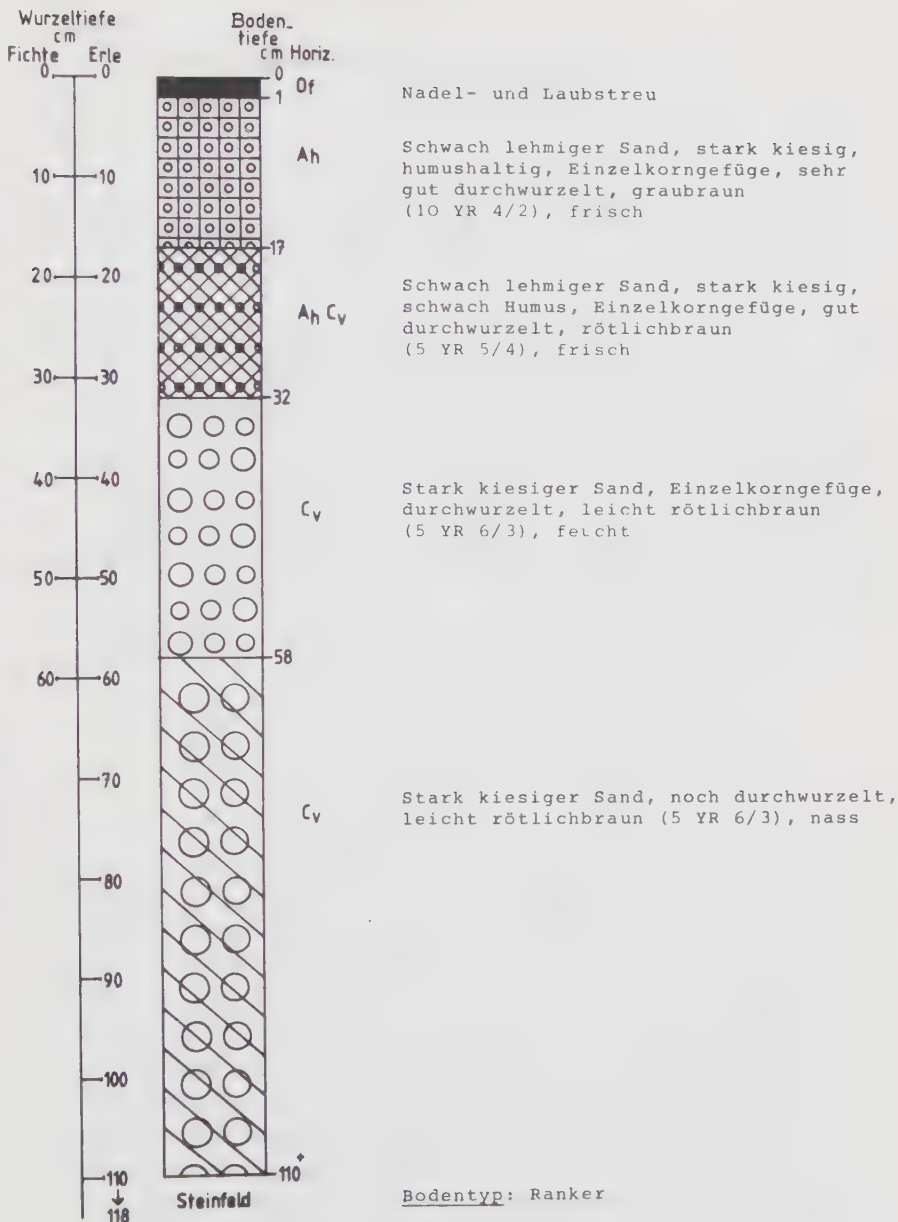
Es handelt sich um ein Zweischichtprofil aus Gneishangschutt anthropogen überdeckt. Grundwasser ist bei 90 cm. Physiologische Gründigkeit (Durchwurzelbarkeit) bis 100 cm. Durchwurzelung bis 90 cm. Hauptwurzelzone 60 cm.

Sandfeld



Es handelt sich um künstliche Sandfüllung (aus der Grube Witt-
 nau) bis 60 cm über der alten Oberfläche. Physiologische Grün-
 digkeit (Durchwurzelbarkeit) 100 cm. Durchwurzelung bis 100 cm.
 Hauptwurzelzone 60 cm.

Steinfeld



Es handelt sich um ein Zweischichtprofil aus sandigem Grobkies über sandigem Feinkies. Entwicklungstiefe des Bodens 40 cm. Kein Zuflußwasser zu erkennen. Physiologische Gründigkeit (Durchwurzelbarkeit) 120 cm. Durchwurzelungstiefe bis 120 cm. Hauptwurzelszone 63 cm.

B. Anlage der Versuche und Beschreibung des Pflanzenmaterials

Die Fichten- und Erlenversuchspflanzen wurden als zweijährig verschulte Pflanzen aus der Pflanzschule Burger in Zell am Harmersbach bezogen. Das Saatgut der Fichten stammte aus dem Herkunftsgebiet 840 08 vom Staatswald Elzach Distrikt II, Abt. 1 und das Saatgut der Schwarzerlen wurde aus dem Herkunftsgebiet 802 07 Staatswald des Forstamtes Kehl in Rheinau-Bischofsheim Distrikt I, Abt. 7 bezogen. Wir übernahmen zur Durchführung unserer Versuche die Versuchsanlage von HASSAN (1976), die in seiner Dissertation eingehend beschrieben worden ist. Sie soll zum besseren Verständnis unserer Versuche noch einmal in kurzen Umrissen wiederholt werden: Bei den angelegten Versuchsanordnungen handelt es sich im wesentlichen um drei Varianten:

Versuchsanordnung I : Fichtenanbau mit Erle gemischt (Fi/El)

Versuchsanordnung II : Fichtenreinanbau (Fi)

Versuchsanordnung III: Fichte mit Fichte gemischt (Fi/Fi)

Der Pflanzverband gem. Versuchsanordnung II (Fi) war ein Quadratverband mit den Ausmaßen 40 x 40 cm. Dies war unser Grundverband, der grundsätzlich für alle anderen Versuchsanordnungen eingehalten wurde und lediglich für die Versuchsanordnung I (Fi/El) und Versuchsanordnung III (Fi/Fi) durch zusätzliche Pflanzen ergänzt worden ist.

Der Pflanzverband der Versuchsanordnung I (Fi/El) unterscheidet sich vom Pflanzverband der Versuchsanordnung II (Fi) lediglich dadurch, daß in die Mitte des Quadrates und zwischen den Eckpflanzen Erlen gepflanzt wurden. Hierdurch wurde erreicht, daß jede Fichteneckpflanze von 4 Erlenpflanzen im

Abstand von 20 cm umgeben war.

In gleicher Weise wurde auch der Pflanzverband der Versuchsanordnung III (Fi/Fi) angelegt, nur mit dem Unterschied zur Versuchsanordnung I, daß anstelle der Erlen Fichten gepflanzt waren, so daß jede Fichteneckpflanze von 4 weiteren Fichtepflanzen im Abstand von 20 cm umgeben war.

Somit erhielten unsere drei Versuchsanordnungen folgende Pflanzverbände:

Versuchsanordnung I : Fi/El: 20-cm-Quadratverband
Versuchsanordnung II : Fi : 40-cm-Quadratverband
Versuchsanordnung III: Fi/Fi: 20-cm-Quadratverband

Jede Versuchsanordnung wurde parzellenweise angelegt, wobei jede Parzelle aus 9 ausgepflanzten Quadraten bestand. Da die einzelnen Prüffeldoberflächen verschieden groß waren, konnten auf ihnen nur verschieden viele Parzellen untergebracht werden:

Auf dem Feuchtfeld :	21 Parzellen
auf dem Naßfeld :	18 Parzellen
auf dem Normalfeld :	20 Parzellen
auf dem Sandfeld :	21 Parzellen
<u>auf dem Steinfeld :</u>	<u>20 Parzellen</u>
zusammen :	100 Parzellen

Alle oberirdischen Pflanzenorgane der insgesamt 100 Parzellen wurden von HASSAN (1976) in seiner Dissertation über "Untersuchungen über Organunterschiede von Fichtepflanzen im Reinbestand und im Mischbestand mit Erlen" untersucht und ausgewertet. Wir hingegen mußten uns bei der weitaus größeren Arbeitsaufwendigkeit der Wurzeluntersuchungen lediglich auf jeweils repräsentative Parzellen von den Versuchsanordnungen Fi/El, Fi und Fi/Fi beschränken, wobei wir

uns von den bereits von HASSAN (1976) ermittelten Mittel-
daten der oberirdischen Sproßorgane leiten ließen, insbe-
sondere was die mittlere Höhe der Pflanzen in diesen reprä-
sentativen Parzellen betraf.

Wir wandten zwei verschiedene Wurzelbestimmungsmethoden an,
auf die im nächsten Kapitel ohnehin näher eingegangen werden
wird:

Die von BARNER (1965) entwickelte Plexiglas-
methode und eine neue Blockmethode, die in gewisser Hinsicht eine Mittel-
stellung zwischen der Plexiglasplattenmethode und der Block-
methode nach GROßKOPF (1950) einnimmt. Wir werteten jeweils
die repräsentativen Parzellen mit den Mittelhöhenpflanzen
folgender Versuchsanordnungen

Versuchsanordnung Fi/El im 20-cm-Quadratverband

Versuchsanordnung Fi im 40-cm-Quadratverband

Versuchsanordnung Fi/Fi im 20-cm-Quadratverband

nach der Plexiglas-
methode von BARNER (1965) aus.

Weil es uns jedoch darum ging, die Wurzelverhältnisse des
Mischanbaus Fi/El in allen Einzelheiten zu bestimmen und so
u.a. auch die vorhandenen Mykorrhizenverhältnisse der Erlen
auszuwerten, die wir mit der Plexiglasplattenmethode nicht
hätten feststellen können, wandten wir die wesentlich ar-
beitsaufwendigere neue Blockmethode in Form einer Kasten-
methode auf der jeweiligen repräsentativen Fi/El-Mischpar-
zelle auf allen fünf Prüffeldern an.

Unsere Pflanzen waren im Jahre 1975 8 Jahre alt. In diesem
Jahr wurden die Auswertungen mit der Plexiglasplattenmethode
durchgeführt. In den darauffolgenden Jahren 1976 und 1977
wurden die Außenaufnahmen mit Hilfe der Kastenmethode durch-
geführt, sodaß wir sagen können, daß während unseres gesamten
Untersuchungszeitraumes die Pflanzen 8-10 Jahre alt waren.

2. Das methodische Vorgehen am Untersuchungsort

Bevor die konkreten Methoden der vorliegenden Arbeit im einzelnen besprochen werden, bedarf es eines kurzen Rückblicks auf die seitherige Wurzelforschung im Waldbau. Bereits die forstlichen Klassiker wie COTTA (1835), KÖNIG (1849), HARTIG (1877) hatten sich eingehend mit Wurzelproblemen auseinandergesetzt und auf die Bedeutung der Bodentiefenerschließung durch die Wurzeln für das Gedeihen der Waldbestände hingewiesen, wobei im großen Ganzen die Autoren des 19. Jahrhunderts sich mit reinen Beschreibungen von Wurzelprofilen begnügten.

Mit Beginn des 20. Jahrhunderts wurden jedoch subtilere Methoden versucht: So hatte u.a. TOLSKI (1904) aus Bodenblöcken Wurzeln ausgewaschen und diese xylometrisch bestimmt. In ähnlicher Weise hatten KATSCHENSKI (1925), KRAUSS (1926), HILF (1927), VATER (1927), WIEDEMANN (1927) und LEITAKARI (1929) einzelne Wurzelstöcke freigelegt und eine Unterscheidung von Haupt- und Feinwurzelverteilung getroffen und diese im photographischen Bild festgehalten. KRAUSS und Mitarbeiter (1932, 1934, 1935 und 1939) hatten es weiter unternommen, Wurzelprofile, also die Gesamtansicht der aus einer Bodeneinschlagswand heraustretenden Wurzeln mit den einzelnen Bodenhorizontverhältnissen zu vergleichen und entsprechend auszuwerten. Später hatten KELLI, HARDMANN und JENNINGS (1947) sich nicht mehr mit der rein äußerlichen Betrachtung von Boden- und Wurzelprofilen begnügt, sondern aus diesen Profilen einzelne Blöcke herausgeschnitten und später im Labor analysiert.

Auf dem Vorgehen dieser Autoren baute GROBKOPF (1950) eine Blockmethode auf, die in seiner Veröffentlichung im Jahre

1950 ihren Niederschlag unter dem Titel "Bestimmung der charakteristischen Feinwurzelintensitäten in ungünstigen Waldprofilen und ihre ökologische Auswertung" gefunden hatte.

Da unsere weiter hinten zu erörternde Kastenmethode gewisse gemeinsame Züge mit der Methode von GROßKOPF (1950) enthält, sich aber von dieser doch in wesentlichen Zügen unterscheidet, soll auf das methodische Vorgehen von GROßKOPF (1950) näher eingegangen werden. Er ging von dem Gedanken aus, daß die Hauptintensität der Wurzelnährstoff- und -wasseraufnahme in erster Linie von den sogenannten Feinwurzeln besorgt würde, also von den Wurzeln mit einem Durchmesser von unter 2 mm. Um nun in dieser Hinsicht einen besseren Einblick zu erhalten, präparierte er beim Einschlag eines Bodenprofils einen Bodenblock aus dem Boden heraus, dessen Wurzeln nach den einzelnen Bodenhorizonten aufgegliedert, bestimmt werden sollten. In Der Originalarbeit schlug er vor, einen Block von der Grundfläche $20 \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$ zu präparieren und stellte dies in einer Federzeichnung dar, die in Abb. 2 wiedergegeben ist.

Der Block wird also bei GROßKOPF (1950) horizontweise abgetragen und jeder einzelne Horizont im Hinblick auf seinen Wurzelgehalt bestimmt. Bei dieser Wurzelgehaltsbestimmung ging er folgendermaßen vor: Im Bereich jedes Horizontes werden die Wurzeln zunächst nach Durchmesserklassen aussortiert und deren Längensumme bestimmt, wobei den Feinwurzeln mit einem Durchmesser von unter 2 mm die ausschließliche Beachtung geschenkt wurde. Die so nach Bodenhorizonten, Durchmesser und Längen sortierten Wurzeln werden hierauf auf die Raumeinheit eines Liter Bodens bezogen, indem man den jeweiligen Rauminhalt eines Horizontes auf das Litermaß bezieht.

Nimmt z.B. ein bestimmter Horizont im Block 60 Liter ein, so müssen die nach Durchmesser klassifizierten Wurzellängen je Liter so berechnet werden, daß sie durch die Zahl 60 ge-

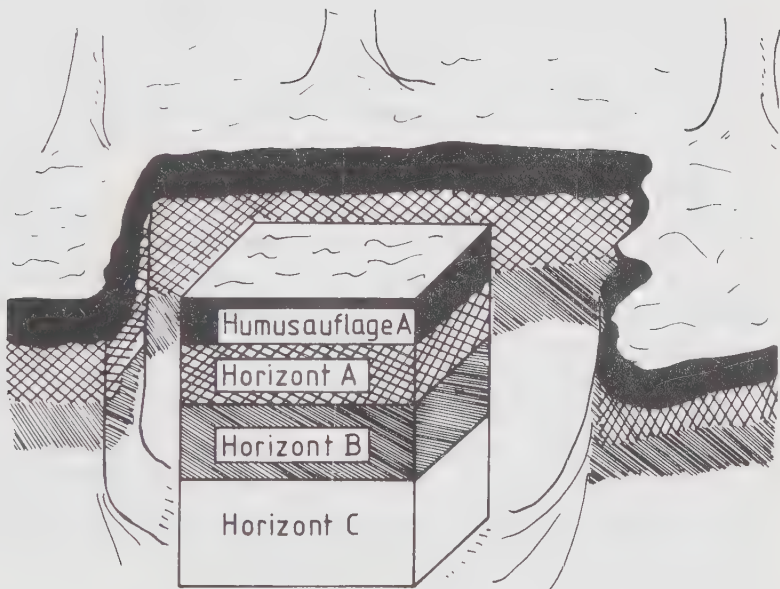


Abb. 2: Herauspräparierung des Bodenblockes nach der Methode GROßKOPF (Zeichnung nach der Originalarbeit aus dem Jahre 1950)

teilt werden. Auf diese Art und Weise wird nun der Block horizontweise bis zur letzten auffindbaren Wurzel abgetragen, um die Bodendurchwurzelung bis zum tiefsten Punkt zu erfassen.

Bereits an dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, daß die Methode GROßKOPF (1950) den Nachteil hat, daß die Herkunft des Wurzelinhaltes des zu untersuchenden Blockes nicht festgestellt werden kann, daß, mit anderen Worten, nicht auseinander gehalten werden kann, von welchen Bäumen die Wurzeln stammen. Es ging GROßKOPF (1950) im wesentlichen darum, lediglich die sogenannte Zwischenflächendurchwurzelung, also das vom Stamm der Bäume entfernter liegende Wurzelgewebe kennenzulernen, als allgemeines Maß für die den Boden durchziehende Durchwurzelung, wobei es ihm hauptsächlich auf die Feinwurzelintensitäten ankam, gleichgültig, von welchen Bäumen diese stammten. Obwohl auch wir eine freilich anders konstruierte Blockmethode für unsere Untersuchungen eingesetzt hatten, kann schon jetzt darauf hingewiesen werden, daß unsere Blockkonstruktion diese methodischen Mängel der Methode GROßKOPF umging, da in unserem Block unsere Versuchspflanzen mit ihren Wurzeln eingeschlossen waren und damit klar gegen die weitere Bodenumgebung abgegrenzt wurden, sodaß ganz leicht jede freipräparierte Wurzel im Hinblick auf ihre Pflanzenherkunft identifiziert werden konnte, daß wir also, mit anderen Worten, exakt darüber Auskunft erhielten, welche Wurzel von welcher Pflanze stammte.

Nach Erscheinen der Arbeit von GROßKOPF im Jahre 1950 wurde dessen Methode im einzelnen diskutiert und auch modifiziert, wobei hier folgende Autoren genannt werden können: HEINRICH (1952), RACHTEJENKO (1952), FEHRENBACHER und ALEXANDER (1955), EHWALD (1955), HOLSTENER und JØRGENSEN (1959), KERN, MOLL und BRAUN (1961), KREUTZER (1961) und BIBELRIETHER (1962), auf deren vergleichsweise zu GROßKOPF (1950) abgewandeltes Vorgehen hier nicht näher eingegangen werden kann. Es wird

in diesem Zusammenhang auf die Originalarbeiten der soeben genannten Autoren verwiesen.

Die dreidimensionale Methode GROßKOPF (1950) zeigt gewisse gemeinsame Züge mit der weiter hinten zu erörternden neuen Kastenmethode, die ihrerseits gewisse gemeinsame Züge mit der von BARNER (1965) entwickelten zweidimensionalen Plexiglasplattenmethode besitzt, sodaß in gewisser Hinsicht allen drei Methoden ein gewisser ideenmäßiger Zusammenhang zu eigen ist. Wir beschreiben somit zunächst die Plexiglasplattenmethode nach BARNER (1965).

A. Nach der Plexiglasplattenmethode nach BARNER

Die Methode ist in dem 1965 erschienen Buch über "Experimentelle Ökologie des Kulturpflanzenanbaus" folgendermaßen beschrieben:

"Auf das Boden- und Wurzelprofil wird eine Plexiglasplatte gelegt, auf die mit Fettstift alle Boden- und Wurzelprofil-
daten, wie Stärke der Wurzeln und Verlauf der Bodenhorizonte, genaue Lage und die Durchmesser der angeschnittenen Wurzeln aufgetragen werden. Die Durchmesser der Wurzeln können mit Hilfe eines Meßschiebers bestimmt werden. Um nun ungehindert an die Wurzeln heranzukommen, wird die Plexiglasplatte so konstruiert, daß aus ihr Teilflächen wie Fenster herausgeklappt werden können, so daß ohne Behinderung jede mögliche Untersuchung an den Wurzeln vorgenommen und die mit Fettstift auf der Platte festgelegten Lagen der Wurzeln auf ihre Lagegenauigkeit nachkontrolliert werden können. Nachdem somit alle Einzelheiten der Boden- und Wurzelprofilbildung und ihre Lagebeziehungen zueinander protokolliert und festgehalten werden können, lassen sich die Aufzeichnungen von der Plexiglasplatte auf Transparentpapier übertragen und reinzeichnen. Eine der vielen möglichen Auswertungen derartiger Darstellungen ist die Ermittlung sogenannter Wurzelschwerpunkte, also der mittleren Tiefe aller ausgezählten Wurzeln unter der Erdoberfläche mit ihren zugehörigen mittleren Wurzeldurchmessern."

Die von BARNER (1965) niedergeschriebenen methodischen Hinweise griff ZETTEL im Jahr 1971 auf und baute sie auf Grund ihrer vielseitigen Auswertungsmöglichkeiten aus, indem er an 80 - 90 Jahre alten Fichtenbäumen auf verschiedenen Standorteinheiten des nördlichen Oberschwabens deren Wurzeln mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode untersuchte. Er kam außer dem schon von BARNER (1965) definierten Wurzelschwerpunkt zu einer Reihe weiterer instruktiver Wurzelkriterien, welche da sind: Die Summenkurve der Wurzeldurchmesser, das

Kriterium der Wurzeldichte und der Abstandssummen, außerdem das Kriterium des Wurzelausnützungsgrades und der Kreisflächen der Feinwurzeln sowie die Feinwurzelintensität, die aber bei Anwendung der Plexiglasplattenmethode anders definiert werden muß als bei GROSSKOPF (1950).

Uns ging es in der Weiterführung der methodischen Bemühungen von BARNER (1965) und ZETTEL (1971) hauptsächlich darum, festzustellen, ob die seither von BARNER (1965) und ZETTEL (1971) lediglich an erwachsenen Bäumen angewandte Plexiglasplattenmethode auch bei unseren 8 - 10 jährigen Pflanzen anwendbar ist und ob bei so jungen Pflanzen auch die gleichen Kriterien mit dieser Methode erarbeitet werden können. Es kann schon jetzt gesagt werden, ohne den weiter hinten vorgestellten Befunden vorzugreifen, daß dies uns voll gelungen ist. Wir konnten sogar die von ZETTEL erarbeiteten Kriterien noch um ein weiteres vermehren, indem wir auf Grund der Plexiglasplattenauswertung eine Summenkurve der Wurzeltiefen ermitteln konnten, die eine vertieftere Einsicht in die Wurzelverhältnisse bietet.

Es braucht nicht sonderlich betont zu werden, daß wir bei der Untersuchung wesentlich jüngerer Pflanzen andere Plexiglasplattenausmaße verwenden mußten. Der Unterschied zwischen dem Vorgehen von ZETTEL (1971) und uns bestand hauptsächlich darin, daß bei ZETTEL die Plexiglasplatten in 10-cm-Tiefenstufen unterteilt worden waren, während wir bei unseren kleineren Wurzeln mit 5-cm-Tiefenstufen arbeiten mußten.

In Abb. 3 ist in ähnlicher zeichnerischer Manier wie die Methode GROSSKOPF (1950), siehe Zeichnung der Abb. 2, die Plexiglasplattenmethode nach BARNER (1965) zeichnerisch dargestellt, bei der wir uns an eine in der Arbeit ZETTEL (1971) veröffentlichte Photographie anlehnten.

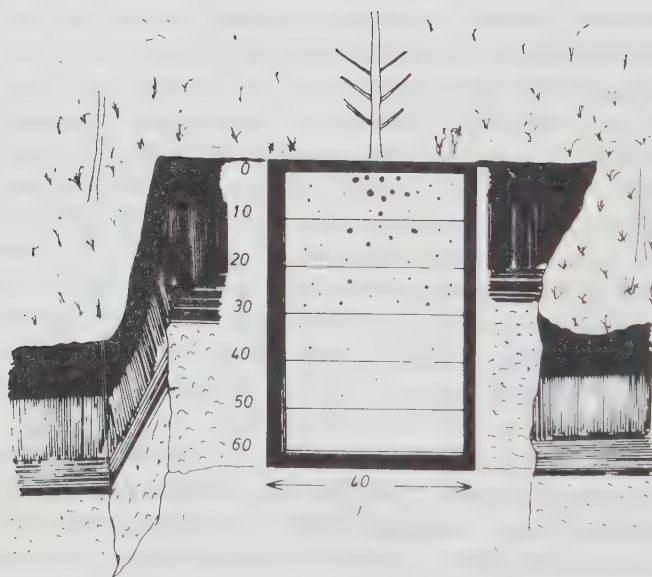


Abb. 3: Darstellung der Plexiglasplatten-
methode nach BARNER (1965), in An-
lehnung an eine in der Arbeit ZETTEL
(1971) veröffentlichte Photographie

Um dem Leser Gelegenheit zu geben, die weiter hinten mitgeteilten, mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode gewonnenen Wurzelbefundskriterien beurteilen zu können, sollen nunmehr diese Wurzelkriterien definiert und gleichzeitig mitangegeben werden, wie diese methodisch zu erarbeiten sind.

a) Wurzelschwerpunkt (WS)

Unter dem Wurzelschwerpunkt verstehen wir das gewogene arithmerische Mittel, bestehend aus dem Produkt aller gemessenen Wurzeltiefen, multipliziert mit den zugehörigen Wurzeldurchmessern. Nachdem nun die Wurzeltiefenmessungen und Wurzeldurchmesser-messungen durchgeführt worden waren, konnten wir die Messungen in zwei gegenüberliegenden Häufigkeitsverteilungen mit ihren Mittelwerten darstellen, so wie dies in Abb. 22 - 26 zu sehen ist.

b) Die Summenkurve der Wurzeldurchmesser (SkWd)

Unter der Summenkurve der Wurzeldurchmesser ist eine nach Wurzeldurchmessergrößen geordnete Hintereinanderfolge aller Wurzeln, beginnend mit dem größten und endend mit dem kleinsten Wurzeldurchmesser zu verstehen. Diese Hintereinanderfolge haben wir in ein Koordinatensystem aufgetragen, und zwar in der Weise, daß auf der Ordinate die sich summierenden Wurzeldurchmesser und über der Abszisse die entsprechenden Wurzelzahlen angegeben sind, wie aus Abb. 27 zu ersehen ist.

c) Summenkurven der Wurzeltiefen (SkWt)

Die Darstellung der Summe der Wurzeltiefen erfolgte analog der Summenkurve der Wurzeldurchmesser, indem in einem Koordinatensystem die Wurzeltiefen, angegeben in Zentimetern, auf der Ordinate über der Anzahl der Wurzeln auf der Abszisse aufgetragen worden sind, wobei sich ähnliche Summenkurven ergaben wie bei der Summenkurve der Wurzeldurchmesser, wie aus Abb. 28 zu ersehen ist.

d) Die Wurzeldichte (WD)

Die Wurzeldichte ist die mittlere Anzahl aller Wurzeln je 100 cm^2 Plexiglasplattenoberfläche, wobei - wie gesagt - bei unserer Plexiglasplattenkonstruktion mit ihren 5-cm-Bodentiefenstufen eine Aufnahmefläche von insgesamt 200 cm^2 zur Verfügung standen.

e) Wurzelabstandssumme (WAs)

Unter der Wurzelabstandssumme verstehen wir die mittlere Abstandssumme im Bereich einer Bodenhorizontfläche von 100 cm^2 , wobei die jeweils kürzeste Entfernung von Wurzel zu Wurzel gemessen worden ist. Die diesbezüglichen Auswertungen sind in Abb. 29 - 33 festgehalten.

f) Der Wurzelausnützungsgrad (WAGr)

Der Wurzelausnützungsgrad ist das Verhältnis zwischen der gemessenen tatsächlichen Abstandssumme zur theoretisch möglichen Abstandssumme, angegeben in Prozenten. Der tatsächliche Wurzelabstand ergibt sich aus dem Quotienten: Tatsächlicher

Wurzelabstand geteilt durch Wurzelzahl (n). Die theoretische Abstandssumme errechnet sich nach der Formel: $\sqrt{\frac{100}{n}}$. Die Verhältniszahl zwischen diesen beiden Größen wird -wie soeben erwähnt- in Form einer Prozentzahl ausgedrückt (siehe hierzu Abb. 34).

g) Der prozentuale Feinwurzelanteil vergleichsweise zu allen anderen Wurzeln mit einem Wurzeldurchmesser von über 1,5 mm

Unter dem Begriff der Feinwurzeln verstehen wir alle Wurzeln mit einem Durchmesser von unter 1,5 mm. Diese Feinwurzeln wurden in das prozentuale Verhältnis mit allen anderen über dem eben genannten Durchmesser liegenden Wurzeln gesetzt und dieses Verhältnis später graphisch dargestellt. Wir mußten den Feinwurzeldurchmesser von unter 1,5 mm deshalb festlegen, weil es sich bei unseren Versuchspflanzen um junge Pflanzen handelte, die ohnehin Wurzeln von nur wenigen Millimetern gebildet hatten. Wir haben die Beträge dieser prozentualen Verhältniszahl in Form eines Säulendiagramms dargestellt, wie es in Abb. 35 abgebildet worden ist.

h) Wurzelkreisfläche (WKfl)

Wir hatten alle Wurzelkreisflächen summiert und die Summen ebenfalls in Form eines Säulendiagramms aufgezeichnet, wobei die einzelnen Säulen Absolutwerte der Wurzelkreisfläche in mm^2 darstellen, wie dies aus Abb. 36 zu ersehen ist.

Es muß nochmals an dieser Stelle betont werden, daß die Plexglasplattenmethode nur eine flächenbezogene Methode ist und daher zwangsläufig in ihrer Aussagefähigkeit eingeschränkt ist. Mit ihr lassen sich u.a. die uns interessierenden My-

korrhizenverhältnisse nicht ausfindig machen, die uns bei den Mischparzellen Fi/El interessierten. Abgesehen davon, daß mit der Plexiglasplattenmethode Wurzeluntersuchungen von Mischbeständen ohnehin problematisch sind, mußten wir daher diese Methode zur Untersuchung unserer Fi/El-Mischparzellen erweitern und gelangten so zu der bereits erwähnten Kastenmethode, die teilweise Züge der Plexiglasplattenmethode und teilweise Züge der Blockmethode nach GROBKOPF (1950) enthält, die im nächsten Kapitel beschrieben werden soll.

Die mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode angefertigten Aufzeichnungen der Wurzeldurchmesser, Wurzeltiefen und deren gegenseitig auswertbare Lagebezogenheit sind in den folgenden Abbildungen 4 bis 18 dargestellt.

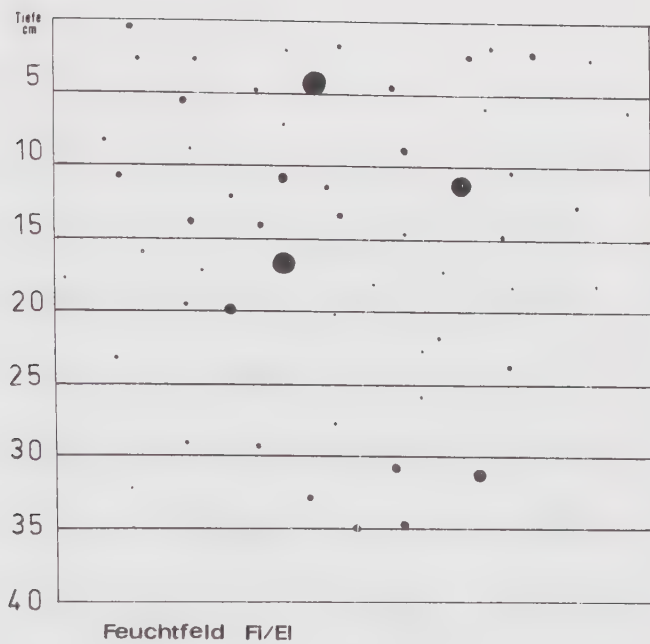
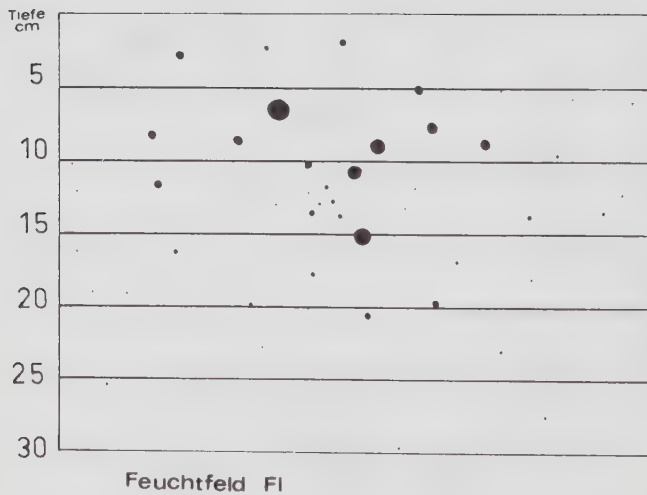


Abb. 4: Plexiglasplattenaufzeichnung der
Mittelpflanzenwurzel der Mischpar-
zellen Fi/EI auf dem Feuchtfeld



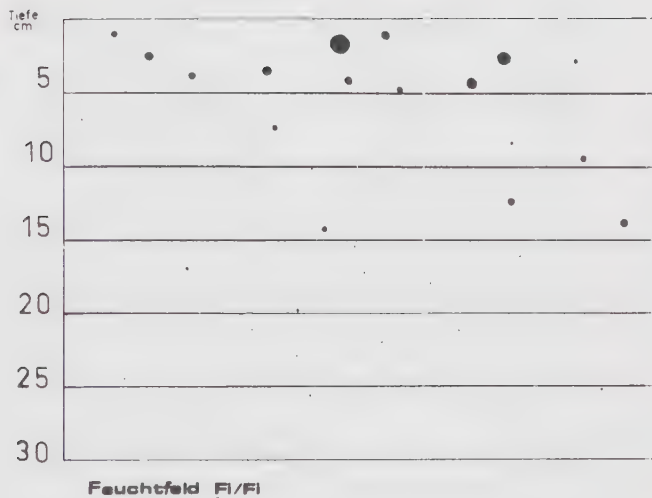


Abb. 6: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Reinparzellen Fi/Fi auf dem Feuchtfeld



Abb. 7: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Mischparzelle Fi/E1 auf dem Naßfeld

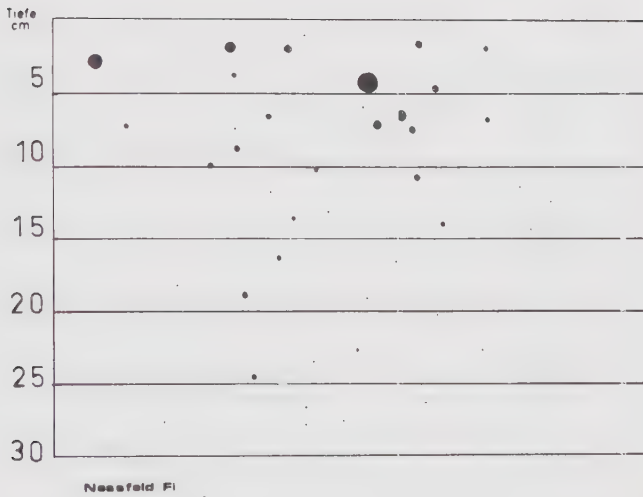


Abb. 8: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Reinparzellen Fi auf dem Naßfeld

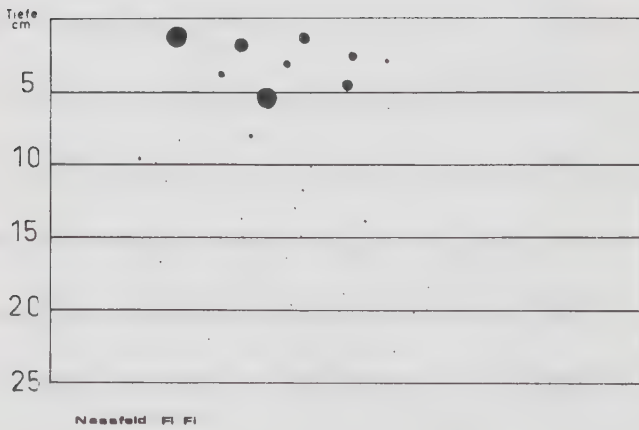


Abb. 9: Flexiglasplattenaufnahme der Mittelpflanzenwurzel der Reinparzellen Fi/Fi auf dem Naßfeld



Abb. 10: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Mischparzellen Fi/E1 auf dem Normalfeld

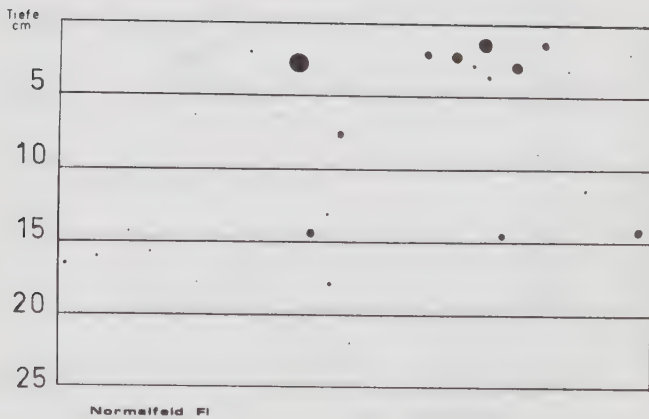


Abb. 11: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Reinpflanzen Fi auf dem Normalfeld

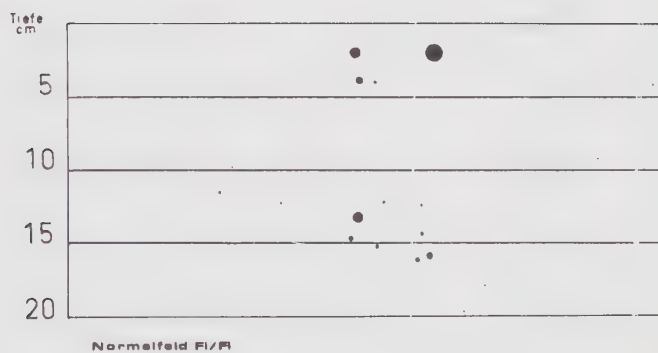


Abb. 12: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Reinparzellen F_i/F_i auf dem Normalfeld



Abb. 13: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Mischparzellen Fi/EI auf dem Sandfeld

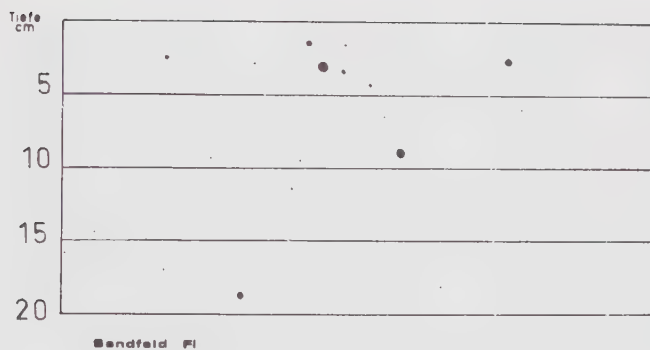


Abb. 14: Plexiglasplattenzeichnung der
Mittelpflanzenwurzel der Reinpar-
zellen Fi auf dem Sandfeld

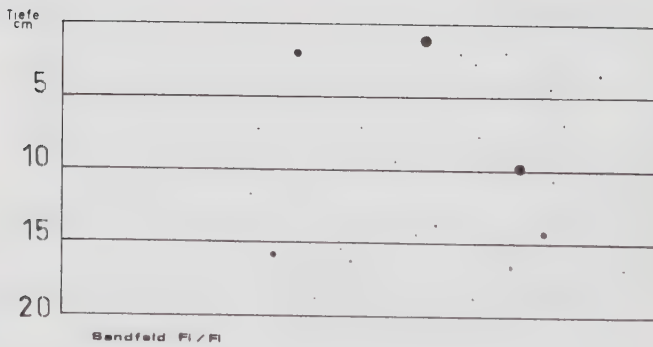


Abb. 15: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Reinparzellen Fi/Fi auf dem Sandfeld

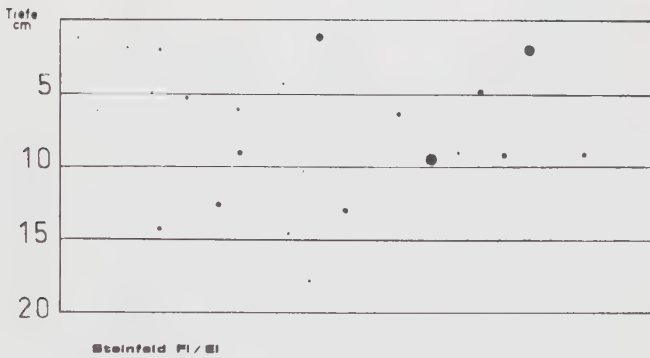


Abb. 16: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Mischparzellen Fi/El auf dem Steinfeld

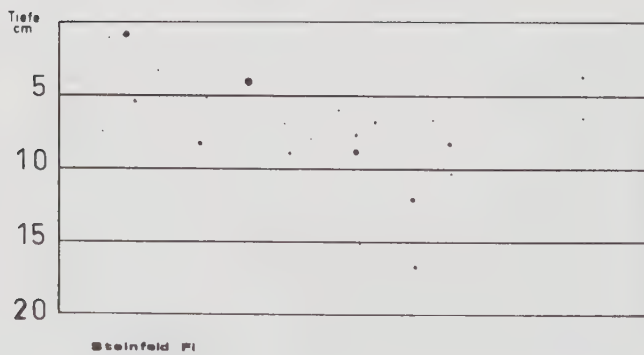


Abb. 17: Plexiglasplattenaufzeichnung der Mittelpflanzenwurzel der Reinparzellen Fi auf dem Steinfeld

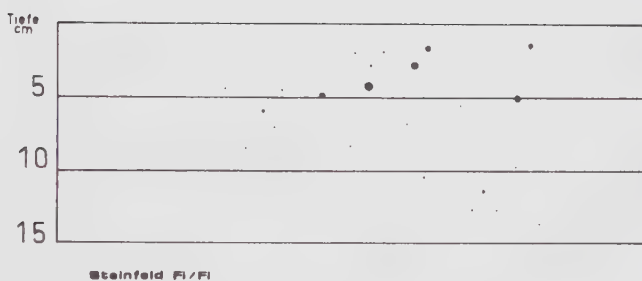


Abb. 18: Plexiglasplattenaufzeichnung der
Mittelpflanzenwurzel der Reinpar-
zellen Fi/Fi auf dem Steinfeld

B. Nach der neu entwickelten Kastenmethode als methodische Kombination zwischen der Plexiglasplattenmethode nach BARNER und der Blockmethode nach GROßKOPF

Bei der Erfassung der Wurzelverhältnisse der aus Fichte und Erle bestehenden Mischbestandsparzellen gaben uns keine in der Literatur mitgeteilten Wurzelbestimmungsmethoden irgendwelche methodischen Hinweise für ein geeignetes Vorgehen, zumal es uns mitunter auch darum ging, die lagebezogenen Wechselbeziehungen der Fichten- und Erlenwurzeln mit den den Erlenwurzeln anhaftenden Mykorrhizen räumlich zu erfassen. Weder die Methoden GROßKOPF (1950) noch die Methoden BARNER (1965), ZETTEL (1971) und die in einem Topf angelegte Wettbewerbsversuchsmethode von LEIBUNDGUT (1976) halfen uns hier weiter.

Zur Entwicklung einer neuen Methode unternahmen wir zunächst eine Reihe von Vorversuchen, indem wir Bodenblöcke, in denen Fichten und Erlen standen, ähnlich wie GROßKOPF (1950) aus der Parzelle herauspräparierten, was aber zur Folge hatte, daß sich nach der Herauspräparation die artverschiedenen Wurzeln von Fichte und Erle gegenseitig verschoben und ihre ursprüngliche Lage im Boden verloren.

Da wir auf diesem Weg nicht weiterkamen, entschlossen wir uns zu einem Vorgehen, das uns garantierte, daß eine Lageverschiebung der Wurzeln ausgeschlossen bleibt und gingen infolgedessen folgendermaßen vor: Wir kesselten von Versuchsanordnung Fi/El eine ganze Mischparzelle von der Bodenoberfläche 80 x 80 cm aus, in deren Bereich 4 Fichten im Quadratverband und eine Erle in der Mitte dieses Quadratverbandes stand. Die Auskesselung erfolgte in der Weise, daß

der um die Oberfläche von 80 x 80 cm gezogene Graben um mehr als 1 m eingetieft wurde, wobei der so allmählich aus dem Boden herauspräparierte Bodenblock eine so große Länge nach unten erhielt, bis diejenige Tiefe erreicht wurde, von der wir annehmen mußten, daß dort keine Wurzeln mehr anzutreffen seien. Auf diese Weise nahm der Bodenblock ein Volumen ein, das gänzlich von der jeweils gebildeten Wurzeltiefe der untersuchten Pflanzen abhing. Die geringste Wurzeltiefe betrug 50 cm und die längste Wurzeltiefe betrug 118 cm. Somit mußten wir verschieden große Bodenblöcke auskesseln bis zu einem maximalen Volumen von $0,77 \text{ m}^3$.

Während der Eintiefung des den Bodenblock umgebenden Grabens wurde dieser sorgfältig gegenüber dem umgebenden Boden abgestützt, damit er zusammenhielt und nicht einfallen konnte. Nachdem der umgebende Graben seine größte Tiefe erreicht hatte, wurde der so unversehrte Bodenblock eingeschalt und zwar mit 10 cm breiten Falzbrettern, die von unten übereinander mit Nut und Feder aufgeschichtet wurden, sodaß zuletzt ein aus Falzbrettern gebildeter Kasten entstand, der den Bodenblock umschloß.

Bei der Freipräparation der Wurzeln gingen wir dann anschließend folgendermaßen vor: Wir legten vorsichtig schichtweise die Wurzeln frei, wobei jede Schicht genau 10 cm stark war. Dies bedeutete, daß wir von oben jeweils ein Falzbrett von 10 cm Breite aus dem Kasten herausnahmen. Damit wurde jeweils eine Tiefenstufe des Bodenblocks für unsere Untersuchung mit dem Kubikinhalt von $64\,000 \text{ cm}^3$ freigelegt.

Dieser aus Boden- und Wurzelsubstrat bestehende Kubikinhalt wurde anschließend so behandelt, daß die Wurzeln mit allerfeinsten Instrumenten (Präpariernadeln und Pinseln) unter Entfernung des Bodens freipräpariert wurden. Anschließend

wurde über dieses so freigelegte Wurzelpräparat eine Plexiglasplatte gelegt, ähnlich, wie dies auch bei der Methode BARNER (1965) gehandhabt wird, wobei diese auf der Nute des darunter liegenden Falzbrettes zu liegen kam. Auf diese Art und Weise konnte man in ungestörter Lage die Wurzeln betrachten und auch zeichnerisch folgendermaßen festhalten, indem auf der Plexiglasplatte alle sichtbaren Wurzeln und deren erkennbare Einzelheiten mit feinem Fettstift aufgezeichnet und festgehalten wurden, so u.a. auch die Lage der an den Wurzeln anhaftenden Mykorrhizen. Um eine Verwechslung der Fichten und Erlenwurzeln in jedem Falle zu vermeiden, verwandten wir bei der Aufzeichnung auf die Plexiglasplatte verschiedene Farben (Erle = rot, Fichte = schwarz). Nachdem nun auf diese Art und Weise mit Hilfe der Plexiglasplatte alle Wurzeleinzelheiten zeichnerisch festgehalten worden waren, wurden diese Aufzeichnungen anschließend auf Transparentpapier übertragen und zuletzt das Bild auf dem Transparentpapier nochmals mit der noch freipräparierten Wurzelschicht verglichen. Einen Eindruck über die Aufzeichnung auf Transparentpapier vermittelt die Abb. 19.

Bei Betrachtung des Wurzelbildes der Abb. 19 ist der genaue Verlauf der Wurzeln von Fichte (schwarze Flächen) und Erle (weiße Flächen) zu ersehen, wie auch deren Überkreuzungen (markiert mit schwarzen Punkten), die uns dazu dienten, das Ausmaß des weiter hinten noch zu definierenden Wurzeldurchdringungsgrades zu bestimmen. Anschließend wurden nun die auf Transparentpapier zeichnerisch festgehalten Wurzeln dieser freipräparierten Schicht abgeschnitten und die Wurzeln getrennt nach Fichte und Erle in Zellophanbeuteln zur weiteren Untersuchung in das Labor gebracht.

Mit Hilfe des die Fichten- und Erlenwurzeln eindeutig abgrenzenden Kastens war es uns auch möglich, die in den Bodenblock eingewachsenen Fremdwurzeln von den Wurzeln unserer unter-



Abb. 19: Eine von der Plexiglaplatte übertragene Transparentpapieraufzeichnung des Wurzelbildes von Fichte (schwarz) und Erle (weiß) mit zusätzlichem Hinweis auf Wurzelüberkreuzungen von Fichte und Erle, die mit schwarzen Punkten markiert sind (weitere Erläuterungen im Text)

suchten Fichten und Erlen sorgfältig zu trennen, da wir die Wurzeln unserer Fichten und Erlen bis zur Hauptwurzel hin verfolgen konnten und da wir somit alle anderen nicht zu den Hauptwurzeln führenden Fremdwurzeln ausschließen konnten, die auch für unsere weitere Untersuchung nicht berücksichtigt worden sind. Die einwandfreie Unterscheidung der eigentlichen Untersuchungswurzeln und der Fremdwurzeln war uns dadurch möglich, daß wir unsere zu den Hauptwurzeln führenden Untersuchungswurzeln angefärbt hatten, so daß niemals eine Verwechslung zwischen Untersuchungswurzeln und Fremdwurzeln vorkommen konnte.

Im Labor wurde nun der Zellophanbeutelinhalt der Fichten- und Erlenwurzeln auf folgende Daten hin bestimmt:

Anzahl der Wurzeln (Wurzelzahl)	=	WZ
Wurzeldurchmesser	=	W $\varnothing$ (mm)
Wurzellänge	=	WL (cm)
Wurzeltrockengewicht (Wurzelgewichte)	=	WG (g)
Wurzelvolumen	=	WV (cm ³)
Wurzelmykorrhizengewichte	=	WMG (g)

Weil uns es in einer späteren Auswertung darauf ankam, die Verhältnisgröße zwischen dem gesamten Wurzelvolumen und dem oberirdischen Sproßvolumen zur Darstellung zu bringen, hatten wir außerdem das oberirdische Sproßvolumen der Pflanzen zusätzlich bestimmt.

Für die soeben beschriebene Art und Weise der Wurzelerfassung eines einzigen freipräparierten Bodenblocks, der schichtweisen bildlichen Erfassung mit der Plexiglasplatte und deren Befundaufzeichnungen auf Transparentpapier, sowie für die Auswertungen der konservierten Wurzeln im Labor benötigten wir im Durchschnitt 4 Monate. Damit ist jedoch noch nicht die Zeit für die numerischen und graphischen Bestimmungen der sogleich näher zu definierenden Kriterien mit eingerechnet.

Dieser große Zeitaufwand veranlaßte uns daher, nur von jedem einzelnen Prüffeld eine Mischparzelle Fi/EI einer Untersuchung mit der Kastenmethode zu unterziehen. Dies genügte auch durchaus, weil wir auf Repräsentativmischparzellen zurückgreifen konnten, deren Mittelwerte bereits HASSAN (1976) mit aller Genauigkeit bestimmt hatte.

Um dem Leser einen ungefähren Eindruck von unserer Kastenmethode zu vermitteln, wie sie an Ort und Stelle im Versuchsfeld angewandt worden ist, fertigten wir auch eine Federzeichnung an, wie sie von der Methode GROSSKOPF und BARNER in Abb. 2 und 3 dargestellt worden sind. Das Prinzip der Wurzeluntersuchung mit Hilfe der Kastenmethode ist in Abb. 20 dargestellt.

Mit Hilfe der Kastenmethode wurden nun folgende Wurzelkriterien numerisch bestimmt und später graphisch ausgewertet:

a) Wurzelzahl (WZ)

Von jeder 10-cm-Tiefenstufe wurden die Wurzelzahlen der von der Hauptwurzel abzweigenden Seitenwurzeln bestimmt, und zwar in der Weise, daß zunächst die Wurzelzahlen aller 4 Fichten bestimmt und deren Werte später gemittelt wurden. Hernach wurden in gleicher Weise die Wurzelzahlen der Erle bestimmt. Nachdem für jede Tiefenstufe die Wurzelzahlen bestimmt wurden, wurden in Graphikas deren Häufigkeiten zur Darstellung gebracht, wobei auf zwei gegenüberliegenden Abszissen die Wurzelzahlen und auf der Ordinate die Tiefenstufen aufgetragen wurden (siehe hierzu Abb. 37).

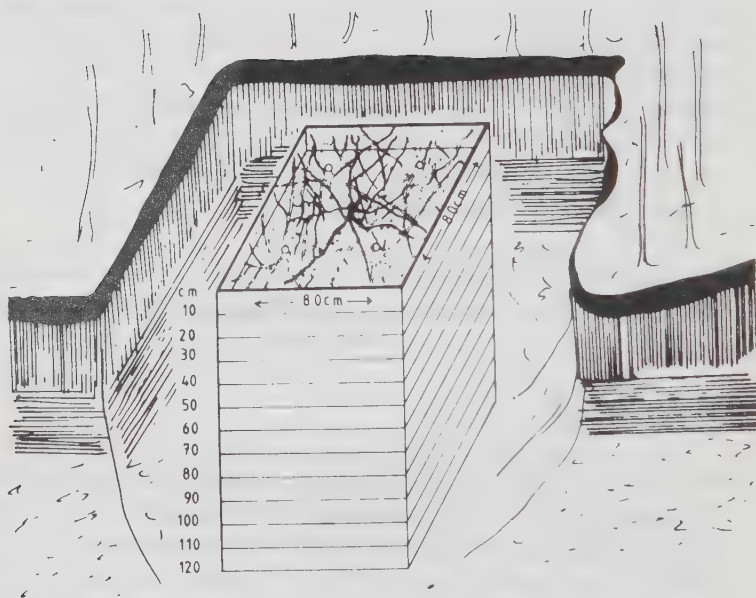


Abb. 20: Darstellung der Wurzeluntersuchung mit Hilfe
der Kastenmethode (Erläuterung im Text)

b) Wurzeldurchmesser (WØ)

Von den gezählten Wurzeln wurde anschließend deren Durchmesser mit Hilfe eines Meßschiebers auf Zehntel Millimeter genau gemessen, wobei die Meßstelle an der Insertionsstelle gesucht worden ist, an der die jeweilige Seitenwurzel von der Hauptwurzel abzweigte. Es wurde auch hier wie bei der Bestimmung der Wurzelzahlen analog verfahren, indem die Daten der vier Fichtenwurzeln gemittelt wurden und diese mit denjenigen der Erle verglichen wurden. Auch die spätere graphische Darstellung wurde analog angelegt: Auf zwei gegenüberliegenden Abszissen wurden die Wurzeldurchmesser in Millimetern und auf der Ordinate die zugehörigen Tiefenstufen aufgetragen (siehe hierzu Abb. 39).

c) Wurzellänge (WL)

Von den gezählten und im Hinblick auf ihre Durchmesser gemessenen Wurzeln wurden auch deren Längen in ganzen Zentimetern bestimmt. Hierbei kam es uns aber darauf an, die Längen der Feinwurzeln von den Längen aller anderen Wurzeln zu unterscheiden, weil wir diese Unterscheidungen graphisch zum Ausdruck bringen wollten. Im Hinblick auf die Definition der Feinwurzeln wichen wir jedoch von GROSSKOPF (1950) und ZETTEL (1971) ab und definierten die Feinwurzeln so, daß zu ihnen nur jene Wurzeln zählen dürften mit einem Durchmesser bis zu 1,4 mm. GROSSKOPF (1950) und ZETTEL (1971) definierten die Feinwurzeln als stärker dimensionierte Wurzeln, nämlich als solche mit einem Durchmesser bis zu 2 mm. Da einerseits unsere Pflanzen jung waren und noch unverhältnismäßig dünne Wurzeln ausbildeten, wäre bei einer Einhaltung von 2 mm Feinwurzel-durchmesser der Anteil der Feinwurzeln, verglichen mit allen höher dimensionierten Wurzeln, viel zu groß ausgefallen. Zum

anderen wurde in der Literatur von HEINRICH (1952) die ursprünglich von GROSSKOPF (1950) angegebenen Feinwurzel-durchmesser von 2 mm angezweifelt mit der Begründung, daß diese Wurzeln zum Teil nicht mehr der Wasser- und Nährstoffaufnahme dienen könnten und kleiner sein sollten. So entschlossen wir uns, für unsere Pflanzen die Feinwurzel-durchmesser bis auf eine Durchmesserstufe von 1,4 mm festzulegen.

Die tiefenstufenbezogene Grob- und Feinwurzelverteilung ist in den Abb. 40 und 41 dargestellt.

d) Wurzeltrockengewicht (WG)

In analoger Weise wie Wurzelzahlen, Wurzeldurchmesser und Wurzellängen wurden auch die Mittelwerte der Trockengewichte der vier Fichten und der in der Mitte der Parzelle stehenden Erle bestimmt, indem wir deren Wurzeln in einen Thermostaten verbrachten und bei 102°C bis zur Gewichtskonstanz trockneten. In ähnlicher Weise wie die Wurzellängen wurden auch deren Trockengewichte gemäß den Abb. 42 und 43 graphisch dargestellt.

e) Wurzelvolumen (WV)

Die gezählten, im Hinblick auf ihre Durchmesser, Wurzellängen und Wurzeltrockengewicht bestimmten Wurzeln wurden zuletzt xylometriert, um deren Wurzelvolumen festzustellen: Wir legten die Wurzeln in mit Öl beschickte, auf cm^3 geeichte Meßzylinder ein und bestimmten auf diese Weise den durch die Wurzeln hervorgerufenen Verdrängungsinhalt, der in einer Hebung des Ölspiegels zum Ausdruck kam. Die so bestimmten Volumina wurden auf cm^3 genau bestimmt. Die rechnerische Datenverarbeitung erfolgte analog der Bestimmung der Wurzelzahlen, Wurzeldurch-

messer und Wurzellänge. Das hierzu gefertigte Graphikum ist in Abb. 44 abgebildet.

f) Wurzelausnützungsgrad (WAG)

Der Wurzelausnützungsgrad mit Hilfe der weiter vorn beschriebenen Plexiglasplattenmethode, so wie er auch von ZETTEL (1971) definiert worden ist, leitet sich aus dem Quotienten der tatsächlichen Wurzelabstandssumme und der theoretischen Abstandssumme ab, wobei sich die tatsächliche Abstandssumme aus dem Quotienten ableitet: Abstandssumme aller Wurzeln, geteilt durch deren Wurzelzahl. Die theoretische Abstandssumme leitet sich durch folgende Formel ab:

$$\sqrt{\frac{100}{\text{Wurzelzahl}}}$$

Die Anwendung dieser Formel ist nur möglich bei einer flächenbezogenen Wurzelbestimmungsmethode, wie sie eben die Plexiglasplattenmethode darstellt.

Da wir es mit der Kastenmethode und daher mit einer raumbezogenen Wurzelbestimmungsmethode zu tun hatten, änderte sich dementsprechend das Verhältnis zwischen der tatsächlich gemessenen Abstandssumme und der theoretisch möglichen Abstandssumme. Die gemessene tatsächliche Abstandssumme beträgt bei einer raumbezogenen Wurzelbestimmungsmethode, wie unserer Kastenmethode: Wurzellängensumme, geteilt durch die Wurzelzahl. Die theoretisch mögliche Abstandssumme beträgt

$$3 \sqrt{\frac{1000}{\text{Wurzelzahl}}}$$

Das Verhältnis zwischen tatsächlich gemessener und theoretisch möglicher Abstandssumme wird in Prozenten angegeben, wobei eben dieser Prozentausdruck das Ausmaß des Wurzeldurchdringungsgrades darstellt.

Die so ermittelten Ausnützungsgrade wurden von Fichte und Erle bestimmt, wobei auch für die Fichte ein Mittelwert der vier um die Erle stehenden Fichten errechnet worden ist. Die somit für die Fichte und Erle ermittelten Werte wurden später in einem Säulendiagramm zur Darstellung gebracht, wobei diese Werte den zugehörigen Bodentiefenstufen zugeordnet worden sind, wie aus Abb. 45 hervorgeht.

g) Wurzeldichte (WD)

Die Wurzeldichte leitet sich aus der Wurzelzahl je Volumeneinheit (Liter) Boden ab. Sie wurde für jede durchwurzelte Tiefenstufe bestimmt und später in Graphika dargestellt, wobei auf der Abszisse die Bodentiefenstufen und auf der Ordinate die zugehörigen Wurzeldichten aufgetragen worden sind, wie aus Abb. 46 zu ersehen ist.

h) Mykorrhizengewicht (WMG)

Von jeder Tiefenstufe wurden sämtliche an den Wurzeln angehängten ektotrophen Mykorrhizen gesammelt und deren Trockengewicht auf Gramm genau bestimmt, und zwar in analoger Weise wie die Wurzel Trockengewichte. Die numerischen Ergebnisse wurden im Graphikum der Abb. 47 festgehalten, wobei auf der Abszisse die Tiefenstufen und auf der Ordinate die Mykorrhizengewichte aufgetragen worden sind.

i) Vergleich zwischen dem Wurzelvolumen und dem Volumen des oberirdischen Sproßachsensystems

Da wir daran interessiert waren, Einsichten in das Verhältnis zwischen dem Wurzelvolumen und dem Volumen des oberirdischen

Sproßachsensystems zu gewinnen, bestimmten wir in gleicher Weise wie das Wurzelvolumen auch das oberirdische Sproßvolumen auf xylometrischem Wege. In einem Säulendiagramm wurden später die beiden Volumina gegenübergestellt (siehe hierzu Abb. 49 und 50).

k) Feinwurzelintensität (FWI)

ZETTEL (1971) hatte in seiner Arbeit nachgewiesen, daß die mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode festgestellte Feinwurzelintensität (bei ihm definiert als die Zahl aller Wurzeln mit einem Durchmesser bis zu 2 mm je einer Flächeneinheit der Plexiglasplatte von 100 cm²) mit der Feinwurzelintensität nach GROSSKOPF (1950) verglichen werden kann. GROSSKOPF (1950) definierte seine Feinwurzelintensität als die Längensumme aller Feinwurzeln bis zu 2 mm Durchmesser je Liter Boden.

Wir versuchten, einen ähnlichen Vergleich herbeizuführen, indem wir je Tiefenstufe, also je Volumeneinheit von 64000 cm³ die Feinwurzelzahlen den Feinwurzellängensummen gegenüberstellten, wobei allerdings zu den Feinwurzeln - wie oben erwähnt - nur diejenigen Wurzeln mit einem Durchmesser von bis zu 1,4 mm in Rechnung gestellt worden waren. Die Gegenüberstellung von Wurzelzahl und Feinwurzelintensität je Tiefenstufe wurde später in den Graphika der Abb. 54 bis 58 zur Darstellung gebracht.

1) Wurzeldurchdringungsgrad, bzw. Überkreuzungshäufigkeit der Wurzeln innerhalb der einzelnen Bodentiefenstufen (WDdG)

Die räumliche Erfassung der Wurzelsysteme mit Hilfe der Kastenmethode erlaubt nun Einblicke, die ansonsten mit keiner

anderen seither veröffentlichten Wurzelbestimmungsmethode gewonnen werden können, nämlich in den Wurzeldurchdringungsgrad, bzw. in die Überkreuzungshäufigkeiten in den einzelnen Bodentiefenstufen. Hierzu ist zu sagen: Die Wurzeln der Fichten und Erlen durchdringen sich gegenseitig, was mit Hilfe der auf die jeweilige Kastenoberfläche aufgelegten Plexiglasplatte festgehalten werden kann. Es ist auf dieser Platte jeder Überkreuzungspunkt zwischen Fichten- und Erlenwurzel erkennbar und kann auf ihr und später auf dem Transparentpapier mit einem Punkt markiert werden, wie in Abb. 19 zu erkennen ist. Später wurden die ausgezählten Überkreuzungspunkte graphisch nach Bodentiefenstufen geordnet, in Abb. 48 ausgewertet und deren Summen in einem Säulendiagramm (Abb. 48 rechts oben) dargestellt.

III. Darstellung der Befunde

1. Die mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode nach BARNER erhobenen Wurzelbefunde an den Fichten

A. Wurzelschwerpunkt (WS)

Die Säulendiagramme der Abb. 21 verdeutlichen einerseits die unterschiedlichen mittleren Wurzeltiefen und mittleren Wurzeldurchmesser in den einzelnen Prüffeldern, wonach sich folgender Zusammenhang ergab: Mit zunehmender Belastung der Prüffelder in der Reihenfolge Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld nimmt die Wurzeltiefe ab. Innerhalb jedes einzelnen Prüffeldes nimmt in der Reihenfolge der Versuchsanordnung: Fichte/Erle, Fichte allein und Fichte/Fichte ebenso die Wurzeltiefe ab, wobei zu erkennen ist, daß die Wurzeltiefenabnahme mit zunehmender ökologischer Belastung immer geringer wird. Die Wurzeltiefenabnahme ist auf dem Feucht- und Naßfeld noch deutlich zu erkennen. Sie läßt jedoch im Bereich des Normalfeldes, des Sandfeldes und des Steinfeldes deutlich nach.

Das Säulendiagramm der Abb. 21 verdeutlicht auch die Veränderung der unterschiedlichen Wurzeldurchmesser, die mit den Wurzeltiefen gleichläufig verlaufen. Auch hier können wir eine Abnahme mit zunehmender ökologischer Belastung in der Reihenfolge Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und

Steinfeld feststellen.

Auch ist gleichermaßen eine Abnahme der Wurzeldurchmesser innerhalb jedes Prüffeldes in der Reihenfolge der Versuchsanordnungen Fichte/Erle, Fichte allein und Fichte/Fichte festzustellen, wobei allerdings zu sagen ist, daß diese Abnahme nicht überall gleich ist: So finden wir auf dem Naßfeld wohl bei der Versuchsanordnung Fichte/Erle den größten Wurzeldurchmesser von 0,19 cm und bei der Versuchsanordnung Fichte allein einen solchen von 0,17 cm, der dann bei der Versuchsanordnung Fichte/Fichte gleichgeblieben ist. Ein gleicher Abnahmetrend ist auch auf dem Sandfeld und Steinfeld festzustellen. Sowohl aus den mittleren Wurzeldurchmessern, als auch aus den mittleren Wurzeltiefen berechneten wir definitionsgemäß die Wurzelschwerpunkte. Um dem Leser eine numerische Übersicht über die Werte der Abb. 21 zu geben, ist eine Zahlenzusammenstellung in Tab. 2 aufgeführt.

Bei den Häufigkeitsverteilungen der Abb. 22 bis 26 sind von jedem Prüffeld zwei Häufigkeitsverteilungen gegenübergestellt: Oberhalb der Abszissenachse die Häufigkeitsverteilung der Wurzeldurchmesser und unterhalb von ihr die der Wurzeltiefen mit Angaben der Mittelwerte, die mit gestrichelten Linien bezeichnet worden sind.

Bei Betrachtung dieser Häufigkeitsverteilungen (Abb. 22-26) zwischen den einzelnen Prüffeldern fällt auf, daß mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder eine Tendenz zur Verringerung der Variationsbreite festzustellen ist.

Bei weiterer Betrachtung ist ganz allgemein festzustellen, daß innerhalb der einzelnen Versuchsanordnungen mit zunehmender ökologischer Belastung die Mehrgipfeligkeit der Häufigkeitsverteilungen verloren geht: Während wir auf dem Feucht-

Feld	Mittelwurzeltiefe in cm			Mittelwurzeldurchmesser in cm			Wurzelschwerpunkt in Prozent		
	Fi/El	Fi	Fi/Fi	Fi/El	Fi	Fi/Fi	Fi/El	Fi	Fi/Fi
Feuchtfeld	16,61	13,99	12,35	0,21	0,19	0,18	17	14	12
Nassfeld	14,50	12,52	11,74	0,20	0,17	0,17	15	13	12
Normalfeld	12,46	11,65	11,60	0,18	0,16	0,14	12	12	12
Sandfeld	9,50	9,26	9,21	0,14	0,12	0,12	10	9	9
Steinfeld	7,76	7,51	6,97	0,13	0,12	0,12	8	8	7

Tab. 2: Tabellarische Zusammenstellung der mittleren
Wurzeliefen- und -durchmesser, sowie der
Wurzelschwerpunkte

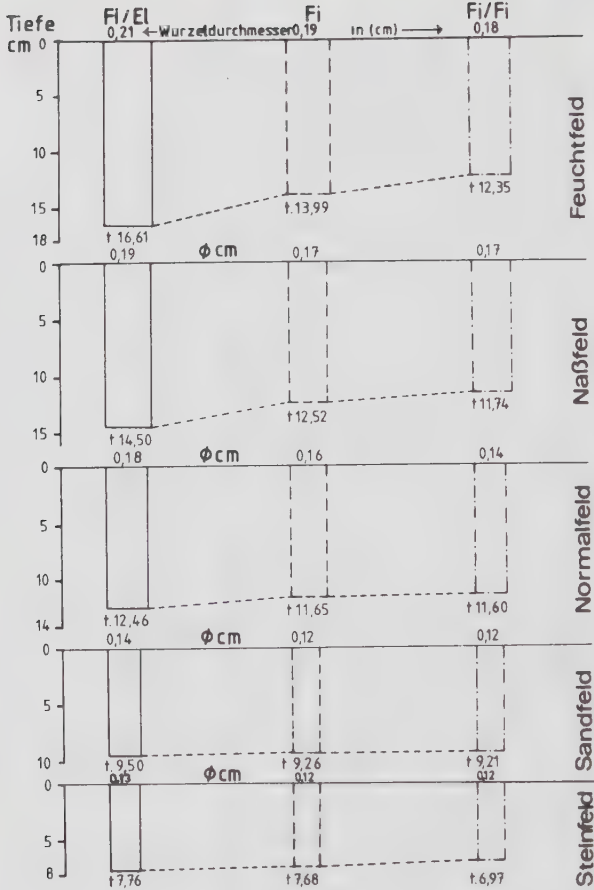


Abb. 21: Angaben über mittlere Wurzeltiefen und Wurzeldurchmesser auf allen fünf Prüffeldern

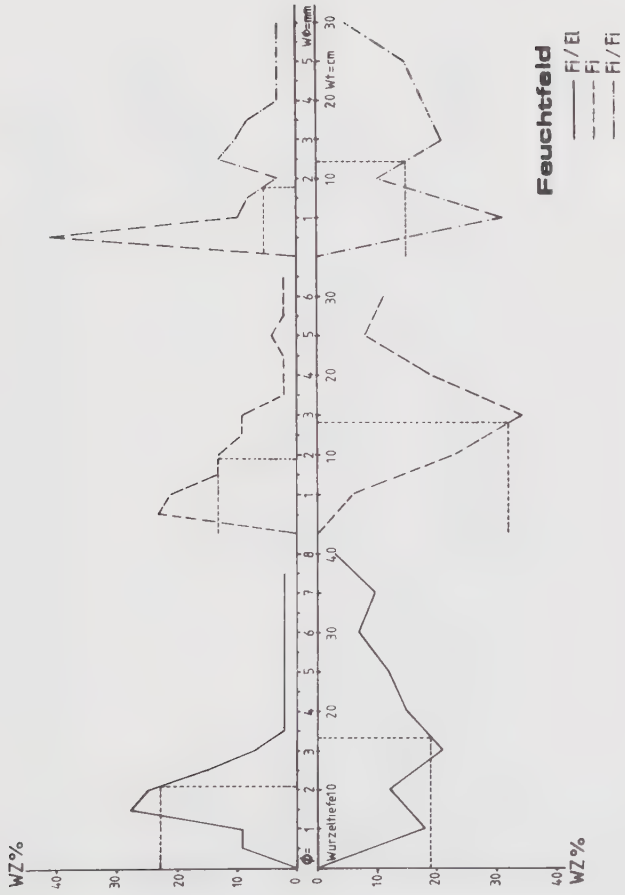


Abb. 22: Häufigkeitsverteilungen der Wurzelschwerpunkt-
 kriterien der Versuchsanordnungen F_i/E_l , F_i und
 F_i/F_i auf dem Feuchtfeld

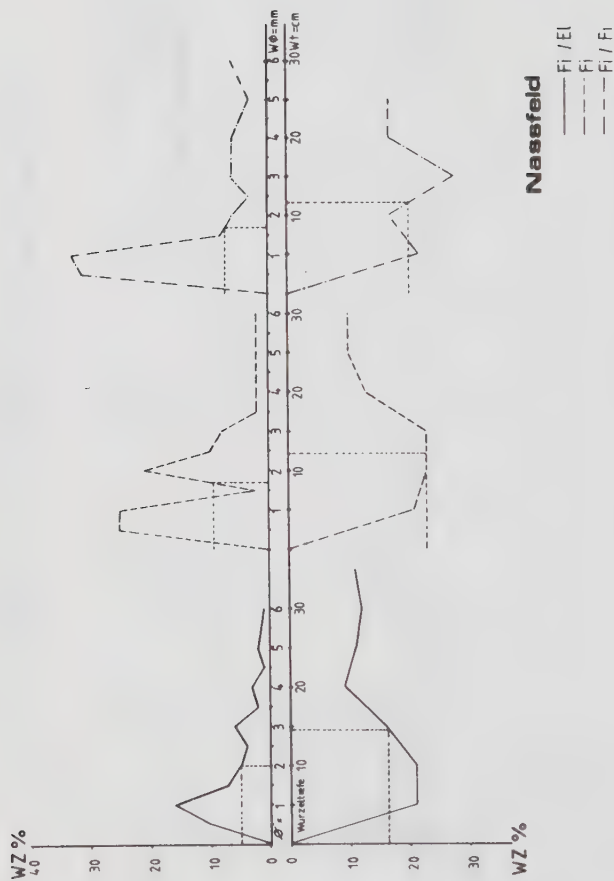


Abb. 23: Häufigkeitsverteilungen der Wurzelschwerpunkt-
kriterien der Versuchsanordnungen Fi/El , Fi und
 Fi/Fi auf dem Nassfeld

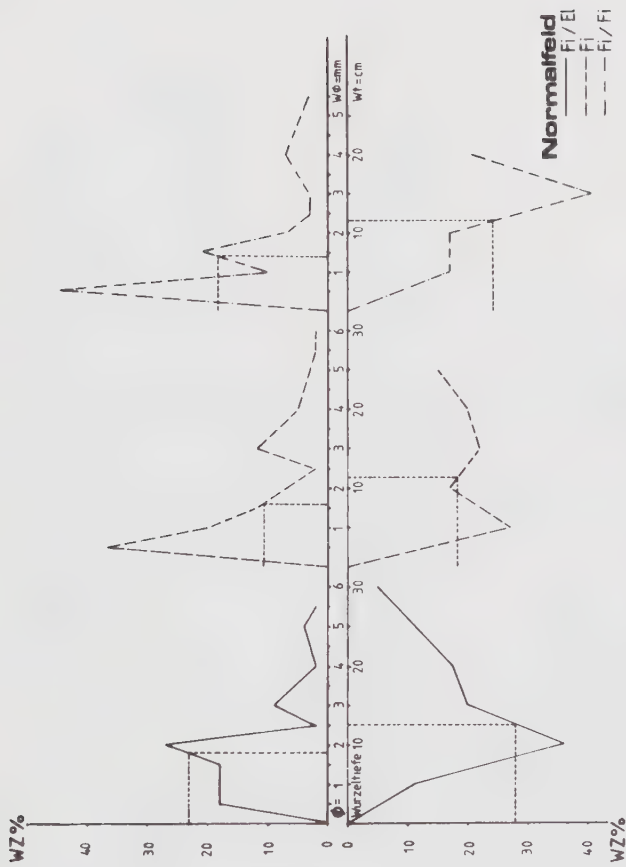


Abb. 24: Häufigkeitsverteilungen der Wurzelschwerpunkt-
kriterien der Versuchsanordnungen Fi/El, Fi und
Fi/Fi auf dem Normalfeld

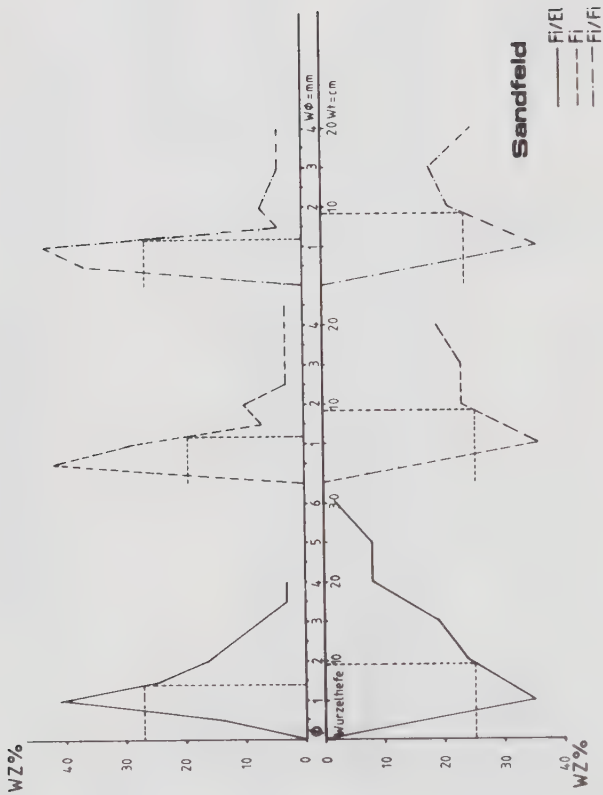


Abb. 25: Häufigkeitsverteilungen der Wurzelschwerpunkt-kriterien der Versuchsanordnungen Fi/EI , Fi und Fi/Fi auf dem Sandfeld

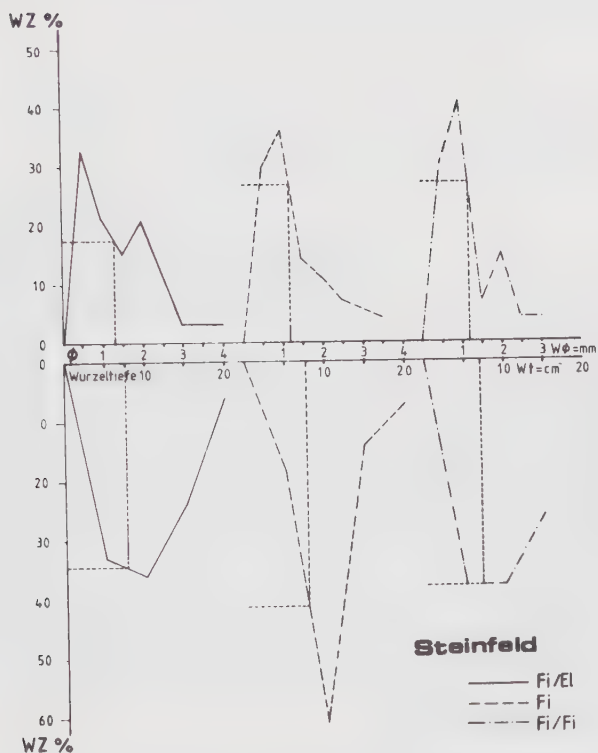


Abb. 26: Häufigkeitsverteilungen der Wurzelschwerpunktkriterien der Versuchsanordnungen Fi/E1, Fi und Fi/Fi auf dem Steinfeld

feld bei allen drei Versuchsanordnungen (Fichte/Erle, Fichte allein und Fichte/Fichte) Mehr Gipfeligkeiten der Häufigkeitsverteilungen feststellen können, finden wir auf dem Steinfeld eine solche nur noch andeutungsweise bei der Versuchsanordnung Fichte/Erle und Fichte/Fichte.

B. Summenkurve der Wurzeldurchmesser (SkWd)

Die im vergangenen Kapitel dargestellten Häufigkeitsverteilungen lassen sich auch in Summenkurven umwandeln.

Wir trugen daher die einzelnen Wurzeldurchmesser nach ihrer Größe geordnet in ein Koordinatensystem ein, beginnend mit dem größten Durchmesser und jeweils folgend mit geringer dimensionierten Durchmesserstufen, wobei jede Durchmesser-Eintragung auf der vorausgegangenen aufbaute, sodaß daraus unterschiedlich steile Summenkurven entstanden.

Der Steilheitsgrad der Summenkurven wird mit zunehmender ökologischer Belastung flacher in der Reihenfolge der Prüffelder: Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld (siehe Abb. 27).

Innerhalb jedes Feldes verläuft die Summenkurve umso länger, je weniger die betreffende Versuchsanordnung ökologisch belastet worden war: So fiel die Summenkurve auf jedem Prüffeld bei der Versuchsanordnung Fichte/Erle am längsten aus, die Versuchsanordnung Fichte/Fichte am kürzesten und die der Fichte allein lag hinsichtlich ihrer Länge zwischen den beiden Versuchsanordnungen Fichte/Erle und Fichte/Fichte.

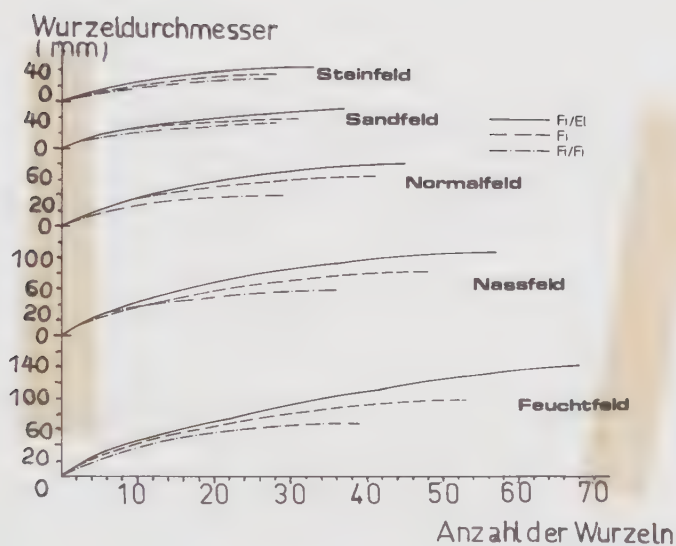


Abb. 27: Summenkurven der Wurzeldurchmesser auf allen fünf Prüffeldern

Die jeweilige Länge jeder Summenkurve hängt weitgehend von der Wurzelzahl ab: So war die Wurzelzahl bei der Versuchsanordnung Fichte/Erle am größten, bei der Versuchsanordnung Fichte/Fichte am geringsten und auch hier lag die Wurzelzahl bei der Versuchsanordnung Fichte allein zwischen den beiden anderen Versuchsanordnungen.

Aus dem Diagramm der Abb. 27 ist weiterhin zu erkennen, daß demgemäß auch mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder die Wurzelzahl abnimmt.

Sowohl im Hinblick auf die Wurzeldurchmessersummenlänge, als auch auf die Wurzelzahl, fand auf dem optimalen Feuchtfeld ein besonders großer Vorsprung der Versuchsanordnung Fichte/Erle gegenüber den beiden anderen Versuchsanordnungen statt, ein Vorsprung, der mit zunehmender ökologischer Belastung auf den übrigen Prüffeldern zurückging.

C. Summenkurve der Wurzeltiefen (SkWt)

In ganz ähnlicher Weise wie die Wurzeldurchmessersummenkurven, wurden auch die Wurzeltiefensummenkurven konstruiert, wonach sich folgende Beziehung ergab: Je höher die Wurzeltiefensummenkurve im Koordinatensystem verläuft, desto mehr setzte sich diese Kurve aus in die Tiefe gehenden Wurzeln zusammen.

Demnach waren alle Wurzeln der Versuchsanordnung Fichte/Erle auf allen Prüffeldern tiefwurzeliger, als die beiden nachfolgenden Versuchsanordnungen Fichte allein und Fichte/Fichte.

Auch hier traten auf dem optimalen Feuchtfeld die Größenunterschiede am deutlichsten hervor, während sie mit zunehmender ökologischer Belastung auf den übrigen Prüffeldern zurücktraten, wie aus dem Graphikum der Abb. 28 hervorgeht.

D. Wurzeldichte (WD) und Wurzelabstandssumme (WAs)

Gemäß den Definitionen der Wurzeldichte und Wurzelabstandssumme in Kapitel II. 2. A d) und e) trugen wir die Werte dieser beiden Kriterien für jede Tiefenstufe und die Versuchsanordnungen Fichte/Erle, Fichte allein und Fichte/Fichte in ein Säulendiagramm ein, wobei bei jeder Tiefenstufe die Werte der Wurzelabstandssummen rechts von der Ordinate und die der Wurzeldichten links von der Ordinate eingetragen wurden. Diese Darstellung findet sich für das Feuchtfeld in Abb. 29, die analoge Darstellung für das Naßfeld in Abb. 30, für das Normalfeld in Abb. 31, für das Sandfeld in Abb. 32 und für das Steinfeld in Abb. 33.

Bei Betrachtung der Abb. 29 bis 33 ist folgende Relation festzustellen: Mit zunehmender ökologischer Belastung in der Reihenfolge der Prüffelder Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld ist gleichermaßen eine Abnahme der Wurzeldichte und der Wurzelabstandssumme festzustellen, wobei sich außerdem die Relation ergab: Je größer die Dichte ausfiel, desto größer fiel der Wert der Wurzelabstandssumme aus.

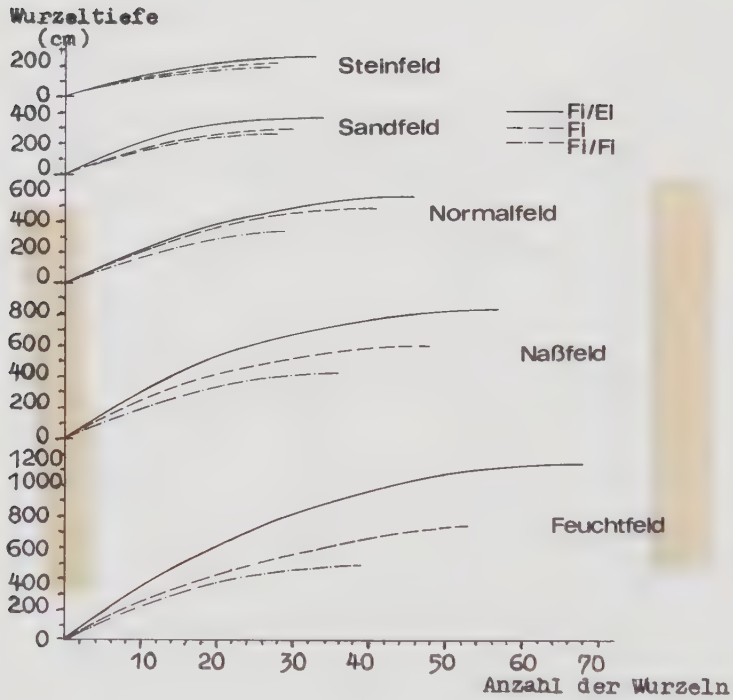


Abb. 28: Summenkurve der Wurzeltiefen
auf allen fünf Prüffeldern

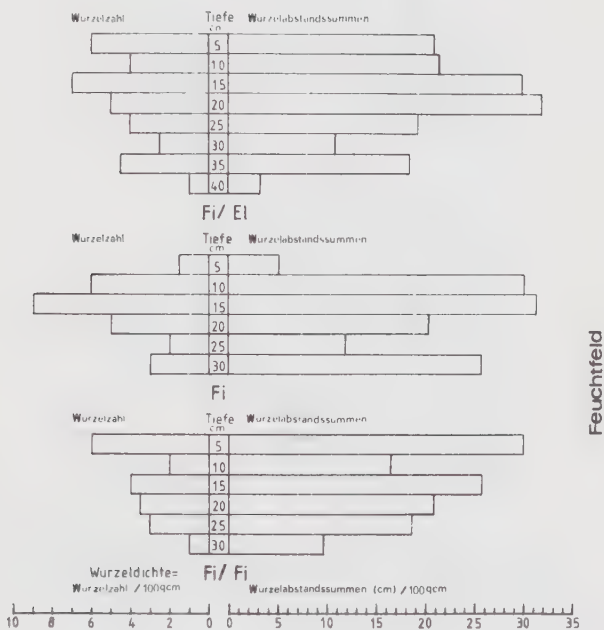


Abb. 29: Gegenüberstellung der Wurzel-
dichten- und -abstandssummen
in den einzelnen Tiefenstufen
auf dem Feuchtfeld

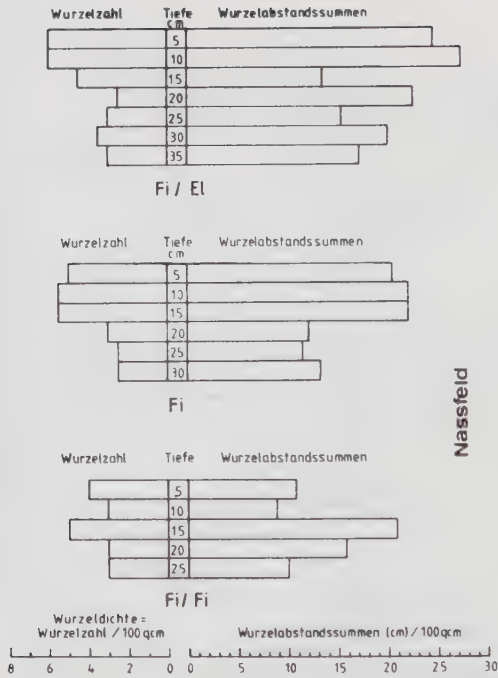


Abb. 30: Gegenüberstellung der Wurzeldichten- und -abstandssummen in den einzelnen Tiefenstufen auf dem Naßfeld

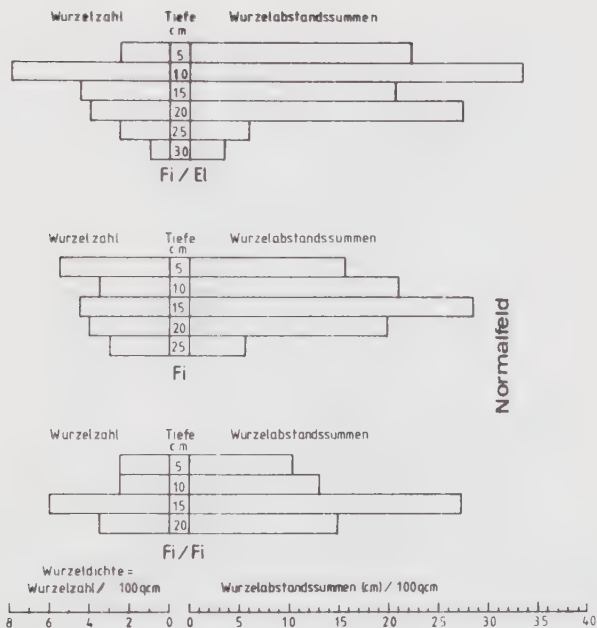


Abb. 31: Gegenüberstellung der Wurzel-
dichten- und -abstandssummen
in den einzelnen Tiefenstufen
auf dem Normalfeld

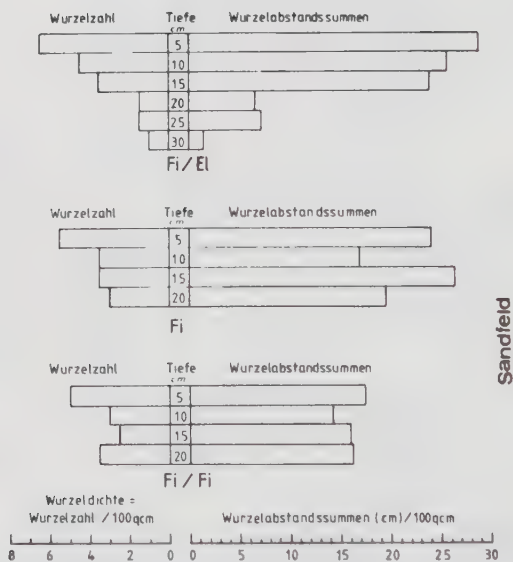


Abb. 32: Gegenüberstellung der Wurzel-dichten- und -abstandssummen in den einzelnen Tiefenstufen auf dem Sandfeld

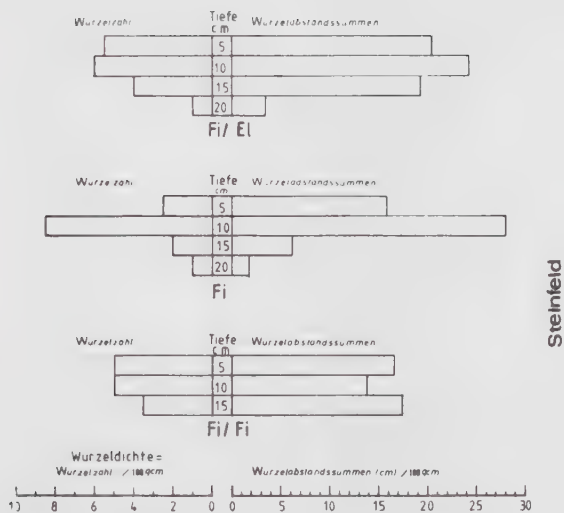


Abb. 33: Gegenüberstellung der Wurzel-dichten- und -abstands-summen in den einzelnen Tiefenstufen auf dem Stein-feld

Außerdem ergab sich auch hier eine versuchsanordnungsspezifische Abstufung: Sowohl die Werte der Wurzelabstandssummen, als auch die der Wurzelichten fielen bei der Versuchsanordnung Fichte/Erle am größten aus, bei der Versuchsanordnung Fichte/Fichte am geringsten, wobei auch hier die Werte bei der Versuchsanordnung Fichte allein in der Mitte lagen.

Sowohl die Größe der Wurzelichte, als auch die der Wurzelabstandssumme hängt weitgehend gemäß den weiter vorn zum Ausdruck gebrachten Definitionen von der Wurzelzahl ab, so daß sich bei Betrachtung der Abb. 29 bis 33 und der Abb. 27 und 28 eine gewisse Gleichläufigkeit ergibt.

E. Wurzelausnützungsgrad (WAG)

In dem Säulendiagramm der Abb. 34 sind die Wurzelausnützungsgrade im Sinne eines Maßes für die Gleichmäßigkeit der Wurzelverteilung im jeweiligen Wurzelprofil zur Darstellung gebracht, deren Säulen bis zur Höhe von 100 % Wurzelausnutzung reichen. Der mit schwarzer Farbe ausgefüllte Raum einer jeglichen Säule gibt das prozentuale Ausmaß der jeweiligen Wurzelausnutzung, und der mit weißer Farbe ausgefüllte Raum gibt entsprechend das der nicht erfolgten Ausnutzung des untersuchten Wurzelprofils an.

Wir erkennen, daß der Wurzelausnützungsgrad mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder zunimmt, wobei sich bei den einzelnen Versuchsanordnungen Differenzierungen ergaben: Die Versuchsanordnung Fichte/Fichte weist auf jedem

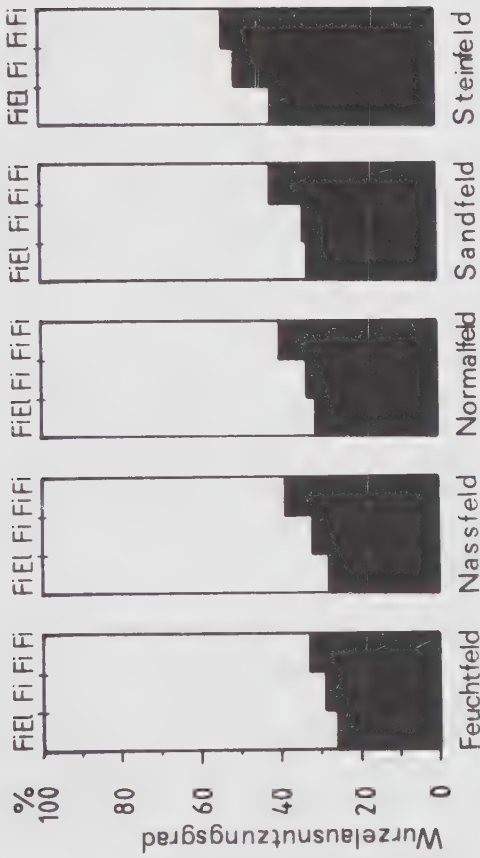


Abb. 34: Darstellung des Wurzelausnutzungsgrades auf allen Prüffeldern

Prüffeld die höchsten, während hingegen die Versuchsanordnung Fichte/Erle die geringsten Wurzel ausnützungsgrade aufweist. Die Versuchsanordnung Fichte allein läßt Wurzel ausnützungsgrade erkennen, die zwischen den beiden anderen Versuchsanordnungen Fichte/Erle und Fichte/Fichte liegen.

F. Prozentualer Anteil der Feinwurzeln vergleichsweise zu dem Wurzelanteil aller anderen Wurzeln

Da wir mit der Plexiglasplattenmethode die Feinwurzeln mit einem Durchmesser bis zu 1,4 mm mit allen anderen größer dimensionierten Wurzeln vergleichen können, ließ sich der prozentuale Anteil der Feinwurzeln vergleichsweise zu dem Wurzelanteil aller anderen Wurzeln bestimmen und auch mit Hilfe eines Säulendiagramms darstellen, das in Abb. 35 wiedergegeben ist:

Wir erkennen ganz ähnlich, wie bei den Wurzel ausnützungsgraden (Abb. 34) eine steigende Reihe: Mit zunehmender ökologischer Belastung nimmt der prozentuale Anteil der Feinwurzeln in der Reihenfolge Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld zu. Innerhalb jedes Prüffeldes war der prozentuale Feinwurzelanteil bei der Versuchsanordnung Fichte/Fichte am größten, derjenige bei der Versuchsanordnung Fichte/Erle am geringsten und der prozentuale Feinwurzelanteil der Versuchsanordnung Fichte allein lag zwischen den eben genannten beiden Versuchsanordnungen.

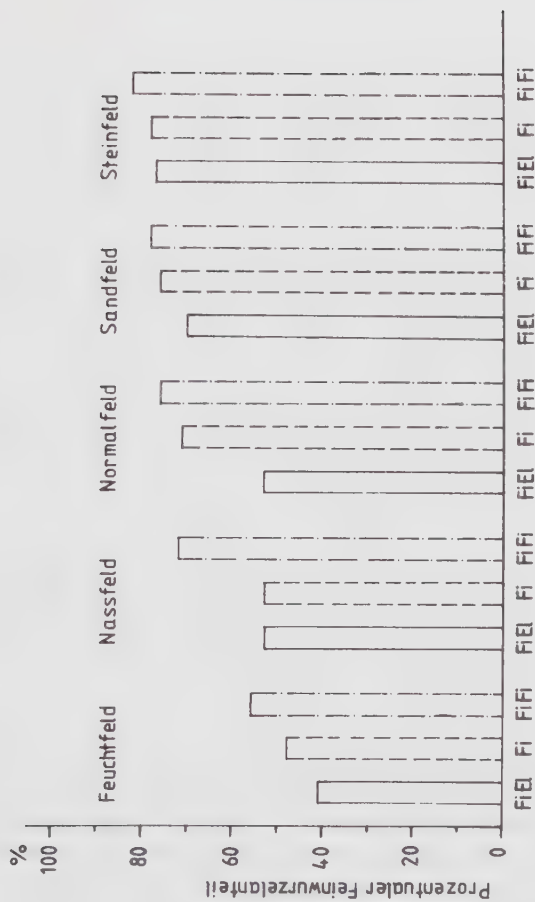


Abb. 35: Prozentualer Anteil der Feinwurzeln vergleichsweise zum Wurzelanteil aller anderen Wurzeln auf allen fünf Prüffeldern

G. Wurzelkreisfläche (WKfl)

Die Wurzelkreisflächen konnten wir rechnerisch aus den mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode erfassbaren Wurzeldurchmessern ableiten und auch hier die Daten mit Hilfe eines Säulendiagramms zur Darstellung bringen (Abb. 36):

Hier erkennen wir eine fallende Reihe: Mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld nimmt die Wurzelkreisfläche ab. Die größten Wurzelkreisflächen wurden bei der Versuchsanordnung Fichte/Erle gebildet, die in ihrer Größe insbesondere beim Feuchtfeld, Naßfeld und Normalfeld die Kreisflächengröße der anderen beiden Versuchsanordnungen deutlich überträgt.

Die geringsten Wurzelkreisflächen wurden bei der Versuchsanordnung Fichte/Fichte gebildet und die Versuchsanordnung Fichte allein blieb im Hinblick auf die Wurzelkreisflächenbildung auch hier in der Mitte zwischen den beiden anderen Versuchsanordnungen.

Die im Säulendiagramm der Abb. 36 ausgewerteten Wurzelkreisflächen sind Summenwerte, angegeben in mm^2 . Diese Summen hängen naturgemäß weitgehend von den Wurzelzahlen- und -durchmessern ab. Dies wird sofort erklärlich, wenn man die Werte der Wurzelkreisflächensummen von Abb. 36 mit der Abb. 27 vergleicht, bei der die Wurzeldurchmessersummen (Ordinate) über der Wurzelzahl (Abszisse) aufgetragen worden sind.



Abb. 36: Darstellung der Wurzelkreisflächen in Form von Summenwerten auf allen fünf Prüffeldern

2. Die mit Hilfe der Kastenmethode erhobenen Wurzelbefunde an den Fichten und Erlen

A. Wurzelzahl (Gesamtwurzelzahl GWZ und Feinwurzelzahl (FWZ)

Wir verfolgten zunächst die Gesamtwurzelzahl ohne eine Unterscheidung zwischen Feinwurzeln mit einem Wurzeldurchmesser bis zu 1,4 mm und den Wurzeln ab dem Durchmesser von 1,5 mm. Die Auswertung erfolgte in der Weise, daß wir auf einer Ordinate die Tiefenstufen von 10 bis 120 cm Tiefe und links und rechts von der Ordinate auf der Abszisse die zugehörigen absoluten Wurzelzahlen auftrugen. Die auf diese Weise für alle Prüffelder aufgezeichneten Graphika sind in Abb. 37 zusammengestellt.

Bei Betrachtung dieser Graphika ist folgendes zu erkennen: Mit zunehmender ökologischer Belastung in der Reihenfolge Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld nimmt die Zahl der Fichtenwurzeln ab. Bei den Erlenwurzeln ist jedoch dieser Trend nicht zu erkennen. Vielmehr ist der Trend eines Minimum-Maximum-Minimum in der Weise zu erkennen, daß von den Wurzelzahlen auf dem Feuchtfeld ein Minimum, auf dem Sandfeld ein Maximum und auf dem Steinfeld wiederum ein Minimum zu finden ist.

Weiterhin erkennen wir zwei Typen von Häufigkeitsverteilungen: Die Häufigkeitsverteilung bei den Fichtenwurzelzahlen ist auf allen Prüffeldern eingipfelig, während die Häufigkeitsverteilungen bei den Erlenwurzeln zur Zweigipfeligkeit neigen, so mehr oder minder ausgeprägt auf dem Feuchtfeld, Normalfeld, Steinfeld und besonders auf dem Sandfeld zu erkennen.

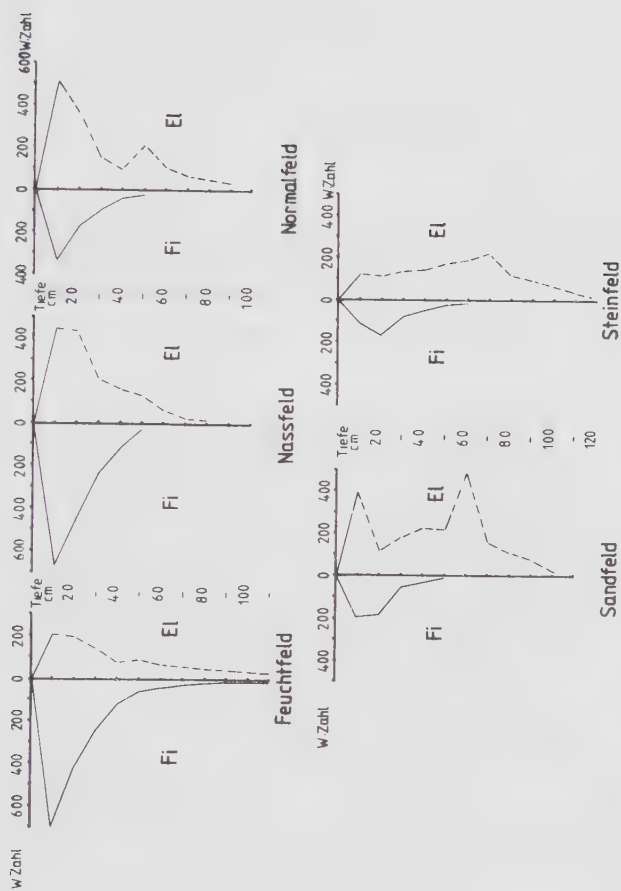


Abb. 37: Verlauf der Wurzelzahlen der Fichten-Erlen-Mischparzellen entlang den Tiefenstufen auf allen 5 Prüffeldern

Es ist aus der Erlenwurzelliteratur bekannt, daß die Erle in zwei Tiefenstufen ihres Wurzelraumes ein Maximum von Wurzelzahlen ausbildet, also ein sogenanntes zweistöckiges Wurzelsystem bilden kann, worauf in der Literatur KREUTZER, K. (1961) hingewiesen hatte, und was wir zum größten Teil mit den Graphika der Abb. 37 bestätigen können.

Von der Fichtenwurzel ist an sich allgemein bekannt, daß sie tellerartig ausgebildet ist, daß sie mit anderen Worten die Hauptzahl ihrer Wurzeln unmittelbar unter dem Wurzelhals ausbildet und ihre Wurzeln hauptsächlich in die bodenoberflächen-nahen Schichten aussendet, wofür ebenso die Graphika der Abb. 37 ein Beleg geben.

Was die erlangte Wurzeltiefe der beiden Holzarten anbetrifft, so können wir bei beiden entlang der Serie der Prüffelder mit zunehmender ökologischen Belastung eine Maximum - Minimum - Maximum - Bewegung feststellen. So wurzelte die Fichte auf dem Feuchtfeld bis zu 110 cm Tiefe, sie erlangte auf dem Naßfeld, Normalfeld und Sandfeld gleichermaßen ein Tiefminimum von 50 cm und stieg im Hinblick auf die Tiefenerschließung beim Steinfeld auf ein Maximum von 60 cm wieder an.

Bei der Erle konnten wir auch eine Maximum - Minimum - Maximum - Bewegung in der Erreichung unterschiedlicher Wurzeltiefen, jedoch im Hinblick auf die Prüffeldserie als eine anders gelagerte feststellen: Bei ihr lag auch das Maximum beim Feuchtfeld in der 110-cm-Bodentiefe, jedoch das Minimum beim Naßfeld in der 80-cm-Bodentiefe, dann wiederum ansteigend bis zum Steinfeld in der 118-cm-Bodentiefe.

Ein Blick in die Graphika der Abb. 37 vermittelt außerdem in instruktiver Weise folgende Wechselbeziehung: Je weniger ein Prüffeld ökologisch belastet ist, desto mehr dominieren die

Fichtenwurzelzahlen gegenüber den Erlenwurzelzahlen. Je stärker ein Prüffeld ökologisch belastet ist, desto mehr dominieren die Erlenzenzahlen gegenüber den Fichtenwurzelzahlen. Wir erkennen diese Wechselbeziehung deutlich, wenn wir die Ergebnisse des am geringsten ökologisch belasteten Feuchtfeldes betrachten: Die Häufigkeitsverteilung der Fichtenwurzelzahlen umschreibt eine weitaus größere Fläche als die der Erlenwurzelzahlen. Auf dem am stärksten ökologisch belasteten Steinfeld liegen die Verhältnisse umgekehrt: Dort wird die Häufigkeitsverteilung der Erlerwurzelzahlen von einer weitaus größeren Fläche umschrieben als die der Fichtenwurzelzahlen.

Bisher betrachteten wir die Wurzelzahlen von Fichte und Erle ohne sonderliche Unterscheidung der Feinwurzeln (mit einem Durchmesser von bis zu 1,4 mm) gegenüber allen anderen Wurzeln (mit einem Durchmesser von über 1,5 mm). Das Säulendiagramm der Abb. 38 zeigt nun den prozentualen Feinwurzelanteil von Fichte und Erle gegenüber allen anderen Wurzeln: Wir erkennen auf einen Blick, daß mit zunehmender ökologischer Belastung in der Reihenfolge des Feuchtfeldes, Naßfeldes, Normalfeldes, Sandfeldes und Steinfeldes der prozentuale Feinwurzelanteil abnimmt, wobei recht deutlich zum Ausdruck kommt, daß die prozentuale Feinwurzelanteil-Abnahme bei der Fichte wesentlich stärker und ausgeprägter verläuft als bei der Erle.

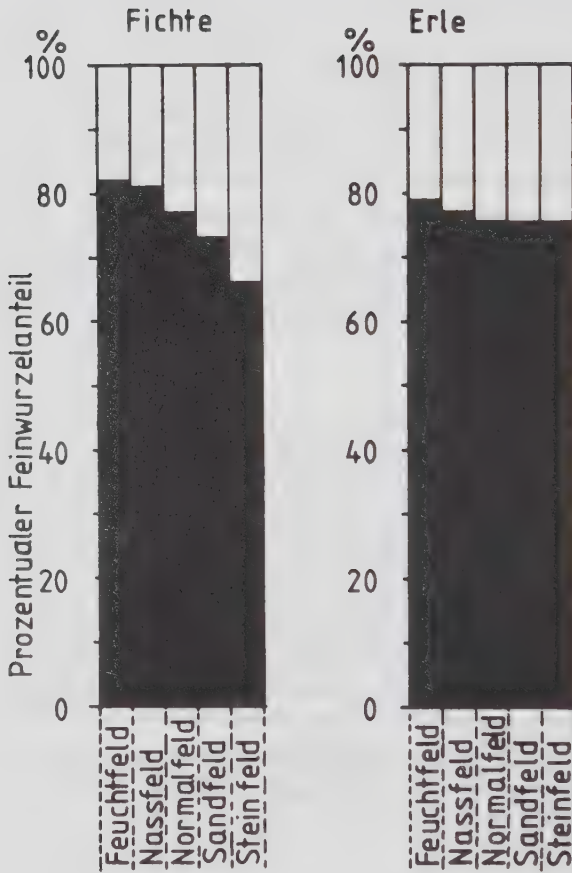


Abb. 38: Die Abnahme des prozentualen Feinwurzelanteils der Fichten/Erlen-Mischparzellen auf allen 5 Prüffeldern

B. Wurzeldurchmesser (WØ)

In den Graphika der Abb. 39 sind die tiefenstufenbezogenen Wurzeldurchmesserentwicklungen auf allen 5 Prüffeldern zur Darstellung gebracht, wobei die Wurzeldurchmesser auf der Abszisse und die zugehörigen Tiefen auf der Ordinate aufgetragen sind. Die Wurzeldurchmesserangaben über die Fichte sind links von der Ordinate und die über die Erle rechts von der Ordinate aufgetragen.

Die jeweilig festgestellten Mittelwerte sind durch einen Querstrich markiert, der jeweils zur Ordinate hin geführt ist.

Aus den Graphika der Abb. 39 ergibt sich für die Fichte folgender Zusammenhang: Mit zunehmender ökologischer Belastung in der Reihenfolge der Prüffelder Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld nehmen die mittleren Wurzeldurchmesser zu.

Hingegen ergibt sich bei der Erle eine andersartige Tendenz: Auch hier nehmen die Wurzeldurchmesser mit zunehmender ökologischer Belastung bis zum Sandfeld zu, hingegen bei dem am stärksten ökologisch belasteten Steinfeld ab.

Wir haben es somit mit folgenden Tendenzen der Wurzeldurchmesserentwicklung zu tun: Mit zunehmender ökologischer Belastung nehmen die Fichtenwurzeldurchmesser in Form einer Minimum - Maximum - Bewegung zu. Hingegen bei den Erlenwurzeldurchmessern findet - wie gesagt - eine Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung statt.

Im Hinblick auf die Erlenwurzeldurchmesserentwicklung deutet sich etwas an, was wir bereits weiter vorn gesehen haben,

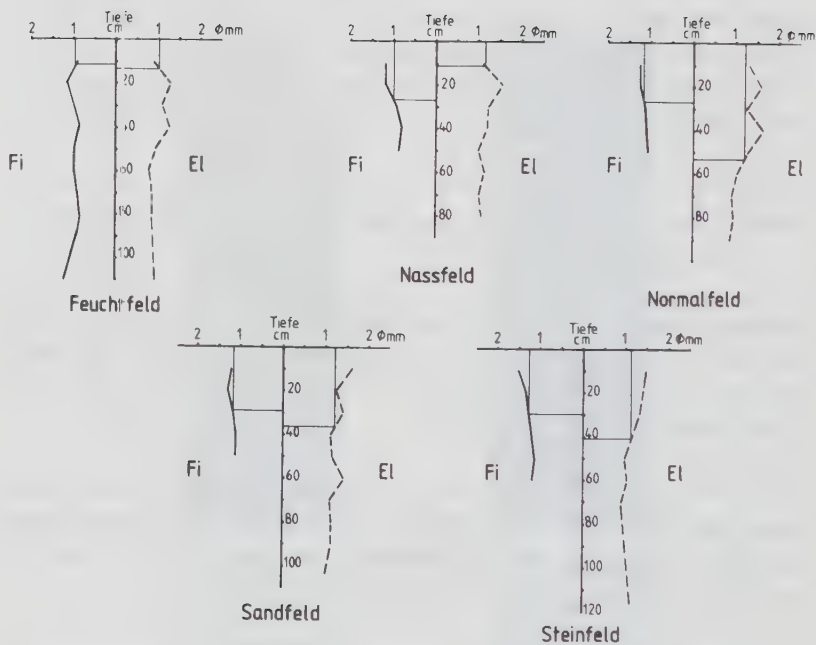


Abb. 39: Verlauf der Wurzeldurchmesser der Fichten/Erlen-Mischparzellen entlang den Tiefenstufen auf allen 5 Prüffeldern

nämlich die zweistöckige Wurzelentwicklung der Erle: Bei ihr finden wir in den bodenoberflächennahen Schichten die höchsten Wurzeldurchmesser, dann etwas tiefer eine gewisse Abnahme und dann noch in weiterer Tiefe wieder eine Zunahme, was als ein Spezifikum der Erlenwurzelentwicklung anzusehen ist, jedoch für die Wurzelentwicklung der Fichte nicht zutrifft.

C. Wurzellängen (WL)

Die Balkendiagramme der Abb. 40 und 41 vermitteln die tiefenstufenbezogenen Wurzellängensummenentwicklungen von Fichte und Erle. Die schwarzen Balken geben die Absolutwerte der Wurzeln von einem Durchmesser von bis zu 1,4 mm, und die weiß gehaltenen Verlängerungsbalken geben die Gesamtwurzellänge mit Einschluß der Feinwurzeln an.

Wir erkennen eine deutliche Maximum - Minimum - Bewegung zunächst bei den Fichtenwurzeln: Mit zunehmender ökologischer Belastung nehmen die Wurzellängen (Gesamtlängen mit Einschluß der Feinwurzellängen) in der Reihenfolge Feuchtfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld ab. Auch hier ist bei der Erle eine Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung festzustellen: Das Maximum findet sich auf dem Sandfeld. Auf dem Steinfeld gehen nun deutlich die Wurzellängen zurück. Wir können bei Betrachtung der Graphika der Abb. 40 und 41 einen Antagonismus in der Wurzellängenentwicklung bei beiden Holzarten feststellen: Je länger die Fichtenwurzeln sind, desto kürzer fallen die Erlenwurzellängen aus und umgekehrt: je länger die Erlenwurzeln ausgebildet sind, desto kürzer fallen die Fichtenwurzeln aus. Dieser Antagonismus tritt ganz besonders

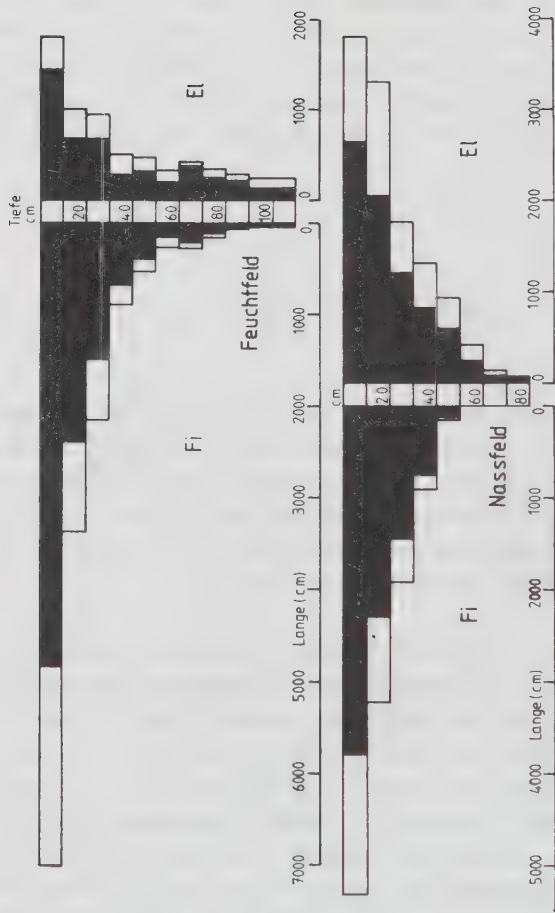


Abb. 4o: Verlauf der Feinwurzellängensummenentwicklung (schwarze Balken) und Gesamtwurzellängensummenentwicklung (schwarze und weiße Balken zusammengefaßt) entlang den Tiefenstufen der Fichten/Erlen-Mischparzellen auf dem Feucht- und Nassfeld

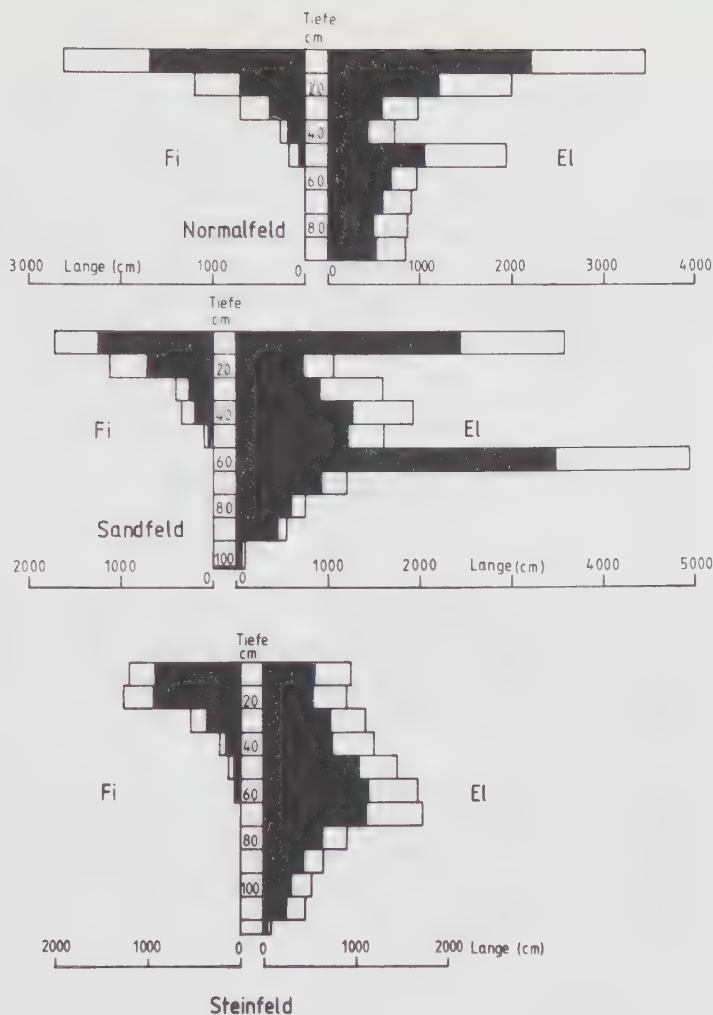


Abb. 41: Verlauf der Feinwurzellängensummenentwicklung (schwarze Balken) und Gesamtwurzellängensummenentwicklung (schwarze und weiße Balken zusammengefaßt) entlang den Tiefenstufen der Fichten/Erlen-Mischparzellen auf dem Normal-, Sand- und Steinfeld

deutlich auf dem Feuchtfeld und auf dem Sandfeld in Erscheinung. Wir sehen außerdem deutlich, daß dort, wo die Fichtenzurzel nicht in größere Bodentiefen vordringen können, die Erlenwurzel die Tiefendurchwurzelung übernimmt. Je mehr also ein ökologisch belasteter Standort für die Fichte physiologisch flachgründig wird, desto mehr tendiert die Erle zu physiologischer Tiefgründigkeit, indem sie die Wurzeln der Fichte mit ihren Wurzeln unterfährt.

D. Wurzeltrockengewicht (WG)

Die Balkendiagramme der Abb. 42 und 43 vermitteln die tiefenbezogene Entwicklung der Wurzeltrockengewichte, wobei die Diagramme ähnlich konstruiert sind wie bei den Diagrammen mit den Angaben über die Wurzellängen (Abb. 40 und 41).

Wir erkennen folgende Beziehungen: Bei der Fichte findet mit zunehmender ökologischer Belastung in der Reihenfolge der Prüffelder Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld eine Abnahme der Wurzeltrockengewichte, somit also eine Maximum - Minimum - Bewegung statt.

Bei der Erle hingegen stellen wir eine Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung fest: Auf dem Feuchtfeld ist das erste Minimum, auf dem Sandfeld das Maximum und auf dem Steinfeld das zweite Minimum festzustellen.

Wenn wir die tiefenbezogene Verteilung der Wurzeltrockengewichte verfolgen, so können wir bei Fichte und Erle einen beträchtlichen Unterschied feststellen: Bei der Fichte bil-

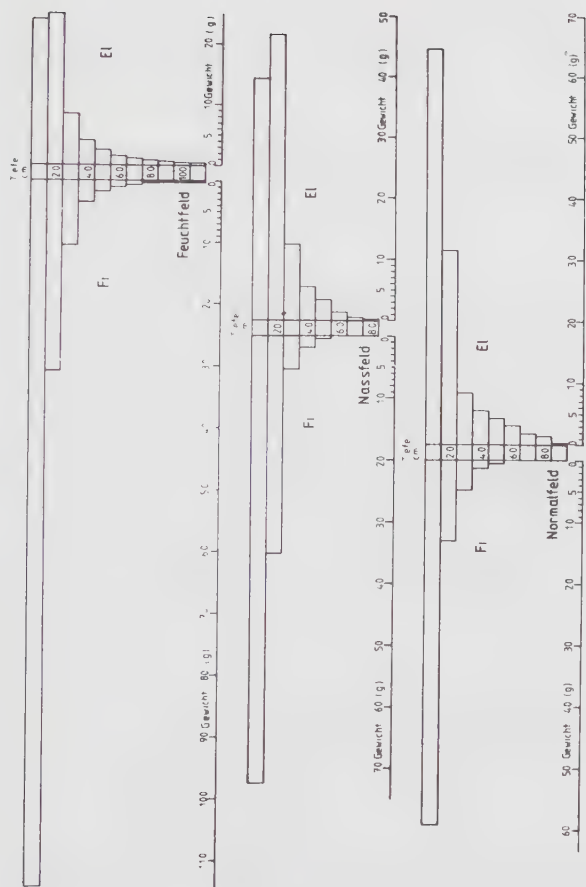


Abb. 42: Verlauf der Wurzelrockengewichtsentwicklung der Fichten/
Erlen-Mischparzellen auf dem Feucht-, Naß- und Normalfeld

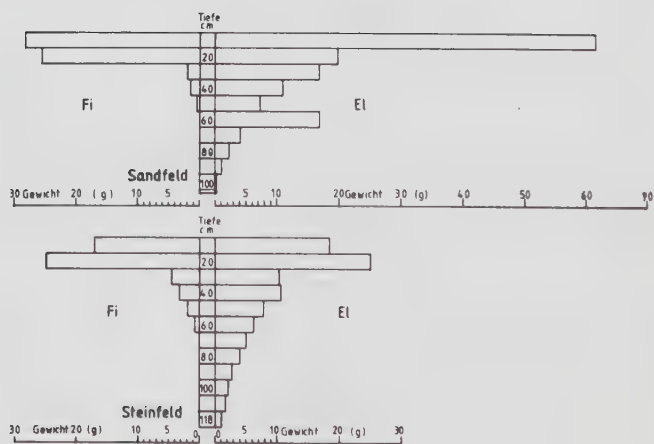


Abb. 43: Verlauf der Wurzeltrockengewichtsentwicklung der Fichten/Erlen-Mischparzellen auf dem Sand- und Steinfeld

dete sich die Hauptmasse der Wurzelrockengewichte in den beiden obersten Tiefenstufen von 10 und 20 cm Bodentiefe aus, wobei sie in den darunterliegenden Tiefenstufen sehr stark abfiel, so daß hierdurch wiederum auch die Fichtenwurzelteilerbildung zum Ausdruck kommt, so, wie wir dies auch schon bei der Wurzel Durchmesser- und -längenentwicklung festgestellt haben.

Bei der Erle findet eine wesentlich gleichmäßigere Trockengewichtsabnahme zur Tiefe hin statt als bei der Fichte.

Während wir bei der Wurzellänge und Wurzelzahl der Erle recht deutlich eine zweistöckige Wurzel Ausbildung feststellen konnten, kommt diese hingegen in der Trockengewichtsbildung weniger zum Ausdruck. Lediglich eine Andeutung zur Ausbildung eines zweistöckigen Wurzelsystems ist auf dem Sandfeld festzustellen, bei dem ein Trockengewichtsmaximum in der 10-cm-Tiefenstufe und ein zweites Trockengewichtsmaximum in der 60-cm-Tiefenstufe festzustellen ist. Aber im Ganzen ist bei Verfolgung der Tiefenstufen der Erle eine gleichmäßige Abnahme der Trockengewichte festzustellen, worauf in der Literatur auch McVEAN (1956) hingewiesen hatte.

Auch bei den Wurzelrockengewichten konnten wir einen Antagonismus feststellen: Je weniger ökologisch ein Prüffeld belastet war, desto stärker bildeten sich die Wurzelrockengewichte bei der Fichte und desto schwächer die Wurzelrockengewichte bei der Erle aus. Je stärker ein Prüffeld ökologisch belastet war, wie z.B. beim Sandfeld, ergaben sich die umgekehrten Verhältnisse: Dort bildeten sich die Wurzelrockengewichte bei der Fichte schwach, hingegen bei der Erle wesentlich stärker aus.

E. Wurzelvolumen (WV)

Das Graphikum der Abb. 44 zeigt die tiefenbezogene Wurzelvolumenentwicklung aller Prüffelder von Fichte und Erle. Sie läßt auf einen Blick erkennen einmal die einstöckige Wurzelvolumenentwicklung bei der Fichte, die im wesentlichen ihr größtes Volumen in den beiden obersten Tiefenstufen ausgebildet hatte. Hingegen finden wir auch hier wieder bei der Erle wie bei Ausbildung der Wurzellängen, der Wurzelzahl und des Wurzelgewichts eine ausgeprägte Ausbildung zur Zweistöckigkeit des Wurzelsystems: Dies kommt insbesondere auf dem Sandfeld zum Ausdruck: Die beiden Maxima liegen in der 10 und 60-cm-Tiefenstufe.

Wenn wir die Gesamtwurzelvolumenentwicklung ohne Berücksichtigung der einzelnen Tiefenstufen betrachten (siehe das Säulendiagramm der Abb. 44), dann erkennen wir auch hier klare Beziehungen: Mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder nimmt bei der Fichte die Wurzelvolumenentwicklung ab. Mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder stellen wir bei der Erle eine Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung fest: Ein geringes Minimum auf dem Feuchtfeld, das Maximum auf dem Sandfeld und ein stärker ausgebildetes Minimum als das des Feuchtfeldes auf dem Steinfeld.

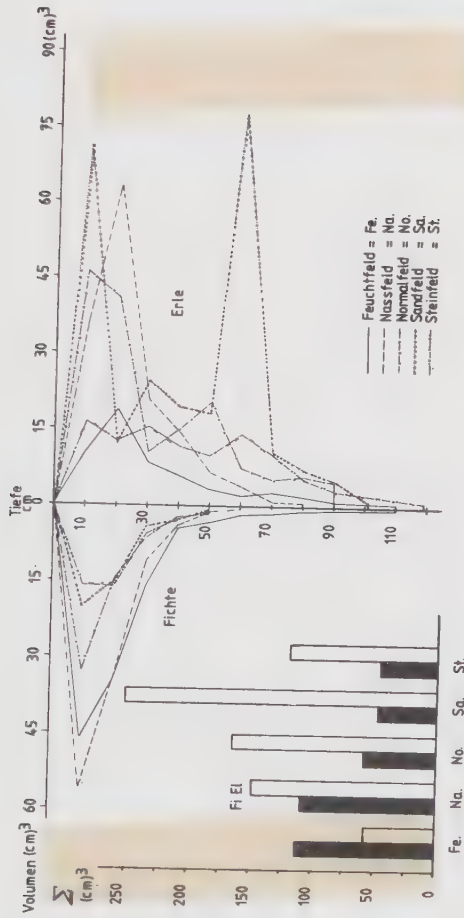


Abb. 44: Tiefenstufenbezogene Ausbildung der Wurzelvolumina (rechtes Graphikum) und Gesamtwurzelvolumenausbildung der Fichten/Erle-Mischparzellen auf allen 5 Prüffeldern (linkes Graphikum)

F. Wurzelausnützungsgrad (WAG)

Der Wurzelausnützungsgrad ist definitionsgemäß ein Maß für die Gleichmäßigkeit der Wurzelverteilung im Boden und stellt das Verhältnis zwischen gemessener tatsächlicher und theoretisch möglicher Abstandssumme dar, wobei die Verhältnisgröße in Prozenten ausgedrückt ist (siehe hierzu die Definition in Kapitel II, 2, B, f).

Im Hinblick auf den Wurzelausnützungsgrad ergeben sich zwischen Fichte und Erle grundlegende Unterschiede: Bei der Fichte nimmt mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld das Ausmaß des Wurzelausnützungsgrades zu, was einer Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung entspricht.

Bei der Erle haben wir es jedoch mit einer Maximum - Minimum - Maximum - Bewegung zu tun: Der stärkste Wurzelausnützungsgrad ist auf dem Feuchtfeld festzustellen. Er nimmt mit zunehmender ökologischer Belastung in der Reihenfolge der Prüffelder Naßfeld, Normalfeld und Sandfeld ab. Auf dem Sandfeld erlangte der Wurzelausnützungsgrad sein Minimum mit 7,8 % und er stieg hierauf lediglich auf dem Steinfeld etwas an, wo wir das zweite Maximum vorfanden, das jedoch weitaus geringer ausfiel als auf dem Feuchtfeld: Während auf dem Feuchtfeld der Wurzelausnützungsgrad 15,05 % betrug, betrug er auf dem Steinfeld lediglich 9,99 % (siehe hierzu die Angaben der Tabelle 3).

Das Graphikum der Abb. 45 ist zweigeteilt: Oberhalb der Abszissenachse sind die Wurzelausnützungsgrade (angegeben in Prozent) für alle Prüffelder eingetragen. Unterhalb der

Ausnutzungsgrad

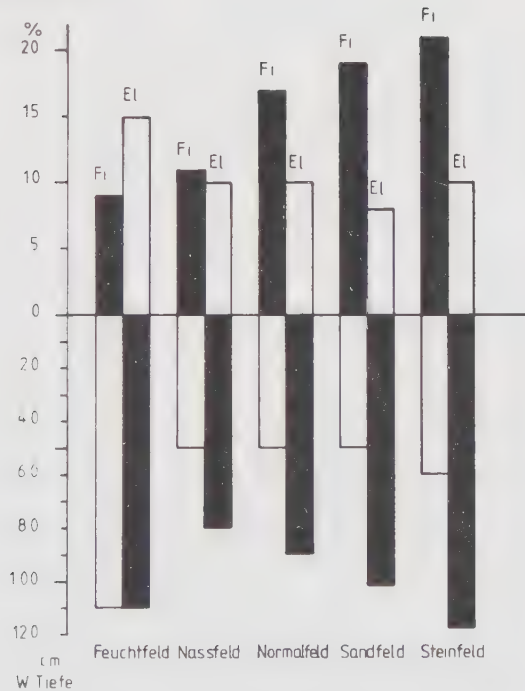


Abb. 45: Wurzel ausnutzungsgrade in den Fichten/Erlen-Mischparzellen oberhalb der Abszissenachse und, spiegelbildlich hierzu, die Tiefenstufen mit dort noch angetroffenen Wurzeln, deren tiefenstufenbezogene Wurzelzahlen in Abb. 37 mitgeteilt sind

Feuchtfeld		Naßfeld		Normalfeld		Sandfeld		Steinfeld	
Fichte	Erle	Fichte	Erle	Fichte	Erle	Fichte	Erle	Fichte	Erle
8,63 %	15,05 %	10,60 %	10,21 %	16,53 %	9,95 %	18,73 %	7,98 %	19,79 %	9,99 %

Tab. 3: Angaben über die Wurzel ausnützungsgrade (in Prozent) in den Fichten/
Erlen-Mischparzellen auf allen 5 Prüffeldern

Abszissenachse sind in vereinfachter Form die Tiefenstufen der dort angetroffenen Wurzeln für Fichte und Erle angegeben, deren tiefenstufenbezogene Wurzelzahlen in Abb. 37 mitgeteilt sind.

G. Wurzeldichte (WD)

In den Koordinatendarstellungen der Abb. 46 ist das Ausmaß der Wurzeldichte (Ordinate) über den einzelnen Tiefenstufen (Abszisse) aufgetragen.

Im Hinblick auf die Fichte ist im großen ganzen mit zunehmender ökologischer Belastung eine Abnahme der Wurzeldichte festzustellen, jedoch in den einzelnen Tiefenstufen verschieden stark: Es ist zunächst vom Feuchtfeld mit einer Gesamtwurzel-tiefe von 110 cm eine Abnahme in Richtung Naßfeld, Normalfeld und Sandfeld festzustellen, wo eine Wurzeltiefe von 50 cm vorliegt. Zwar nimmt die Wurzeldichte der Fichte auf dem Steinfeld noch stärker ab als auf dem Sandfeld, doch dringt die Fichte auf dem Steinfeld mit ihren Wurzeln bis zu einer Tiefe von 60 cm vor, während sie auf dem Sandfeld nur bis zu einer Tiefe von 50 cm vordringen kann.

Im Hinblick auf die Erle können wir eine gegenläufige Tendenz vergleichsweise zur Fichte feststellen: Bei ihr können wir eindeutig eine Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung feststellen: Das erste Minimum ist auf dem Feuchtfeld mit 14,42 Wurzeln je Liter Boden festzustellen. Die Bewegung nimmt nun deutlich mit zunehmender ökologischer Belastung zu und er-

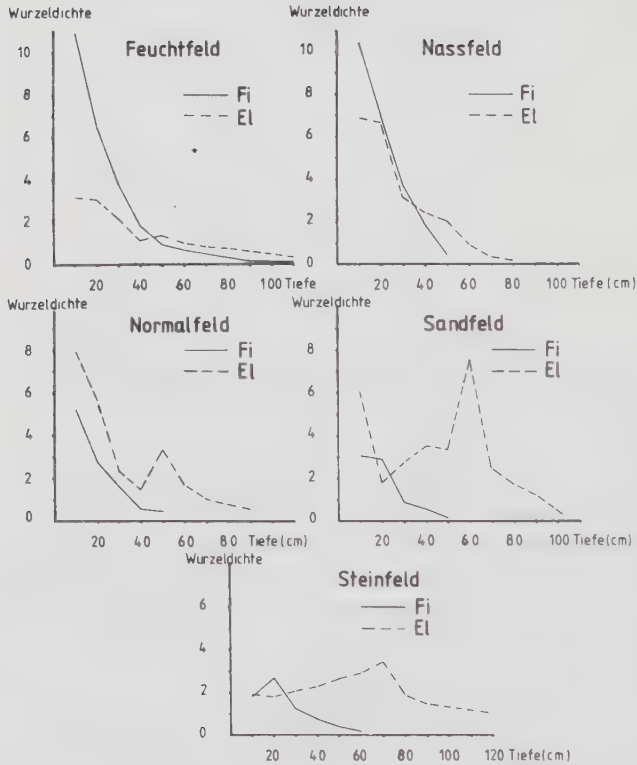


Abb. 46: Die Ausbildung der Wurzeldichten (Anzahl der Wurzeln je Liter Boden) (Ordinate), bezogen auf die zugehörigen Tiefenstufen (Abszisse) in den Fichten/Erlen-Mischparzellen auf allen 5 Prüffeldern

reicht ein Maximum auf dem Sandfeld mit 30,71 Wurzeln je Liter Boden. Dann fällt die Wurzeldichte auf dem Steinfeld wieder zurück auf eine Wurzeldichte von 21,48 Wurzeln je Liter Boden. Bei dieser Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung liegt also das zweite Minimum auf dem Steinfeld höher als das erste Minimum auf dem Feuchtfeld (die numerischen Werte sind in Tabelle 4 zusammengestellt).

Im großen ganzen fällt also die Wurzeldichte bei der Fichte mit zunehmender Bodentiefe ab (siehe ausgezogene Linien der Graphika der Abb. 46). Bei der Erle haben wir aber keineswegs eine auf allen Prüffeldern abfallende Kurve. Wir erkennen auch hier deutlich die Tendenz zur Bildung eines zweistöckigen Wurzelsystems, wobei in der Tiefenstufe von 50, 60 und 70 cm ein Anstieg der Wurzeldichten festzustellen ist: Auf dem Feuchtfeld in der Tiefenstufe von 50 cm, auf dem Naßfeld ebenfalls in der Tiefenstufe von 50 cm, auf dem Normalfeld schon wesentlicher ausgeprägt ebenfalls in der Tiefenstufe von 50 cm. Auf dem Sandfeld prägte sich ein ganz deutlicher Anstieg in einer Tiefenstufe von 60 cm aus, wobei die Werte dieses Anstiegs die Werte der obersten Tiefenstufe übertrafen. Ein Anstieg der Wurzeldichte ist auch auf dem Steinfeld in einer Tiefenstufe von 70 cm festzustellen, dessen Werte höher liegen als in der obersten Tiefenstufe. Bei 70 cm Tiefe betrug auf dem Steinfeld die Wurzeldichte 3,45 Wurzeln je Liter Boden und in der höchsten Tiefenstufe von 10 cm betrug die Wurzeldichte 1,88 Wurzeln je Liter Boden.

Wenn wir das Verhältnis zwischen Fichte und Erle im Hinblick auf die Wurzeldichte gemäß den Graphika der Abb. 46 betrachten, dann können wir eine Wechelseitigkeit in der Dominanz zwischen Fichte und Erle feststellen: Auf dem Feuchtfeld und Naßfeld dominierte die Wurzeldichte der Fichte über die der

Tiefe (cm)	Feuchtfeld		Naßfeld		Normalfeld		Sandfeld		Steinfeld	
	Fichte	Erle	Fichte	Erle	Fichte	Erle	Fichte	Erle	Fichte	Erle
10	10,95	3,17	10,48	6,88	5,27	7,97	3,03	6,05	1,78	1,88
20	6,56	3,03	7,09	6,69	2,77	5,66	2,89	1,81	2,69	1,80
30	3,80	2,14	3,72	3,17	1,59	2,34	0,84	2,75	1,27	2,06
40	1,83	1,16	1,89	2,41	0,56	1,47	0,53	3,50	0,75	2,22
50	0,97	1,34	0,44	2,02	0,48	3,30	0,14	3,34	0,38	2,67
60	0,66	1,00	---	0,90	---	1,64	---	7,52	0,20	2,92
70	0,50	0,84	---	0,33	---	1,00	---	2,47	---	3,45
80	0,33	0,73	---	0,17	---	0,75	---	1,72	---	1,88
90	0,16	0,63	---	---	---	0,53	---	1,25	---	1,50
über 100	0,16 ⁺	0,38 ⁺	---	---	---	---	---	0,30 ⁺⁺	---	1,10 ⁺⁺⁺
Summe	25,91	14,42	23,62	22,59	10,67	24,66	7,43	30,71	7,07	21,48
Mittel	2,36	1,31	4,73	2,82	2,13	2,77	1,50	3,01	1,18	1,89

Tab. 4: Zusammenstellung der numerischen Wurzeldichtenwerte,
welche zu den Graphika der Abb. 46 gehören

+ Tiefe bis 110 cm
++ Tiefe bis 102 cm
+++ Tiefe bis 118 cm

Erle. Auf den übrigen Belastungsfeldern Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld dominierte jedoch die Wurzeldichte der Erle über diejenige der Fichte, was ganz besonders ausgeprägt auf dem am stärksten ökologisch belasteten Steinfeld der Fall ist.

Zuletzt ist noch auf folgendes hinzuweisen: Von einer ganz bestimmten Wurzeltiefe ab dominiert die Wurzeldichte der Erle gegenüber der Fichte: Auf dem Feuchtfeld ab der Wurzeltiefe von 45 cm, auf dem Naßfeld ab der Wurzeltiefe von 35 cm, auf dem Normalfeld ab der Wurzeltiefe von 10 cm, auf dem Sandfeld ab der Wurzeltiefe von 10 cm und auf dem Steinfeld ab der Wurzeltiefe von 25 cm.

H. Mykorrhizengewichte (WMG)

Wie bereits im methodischen Teil dargelegt, wurden in den verschiedenen Tiefenstufen die Mykorrhizengewichte der Wurzeln der Erlen bestimmt, wobei wir gleichermaßen viele kleine kugelförmige, aber auch wenige große, mehr eiförmige Mykorrhizen vorfanden und freipräparierten. Wie dargelegt, ging es uns jedoch lediglich darum, nur die tiefenbezogenen, den Wurzeln anhängenden Mykorrhizengewichte in Gramm/Trockengewicht zu bestimmen.

Aus dem Säulendiagramm der Abb. 47 ist zu erkennen, daß die Mykorrhizen auf den fünf Prüffeldern in verschiedenen Tiefenstufen vorgefunden wurden. Was die Ausbildung der Mykorrhizengewichte anbetrifft, können wir mit zunehmender ökologischer

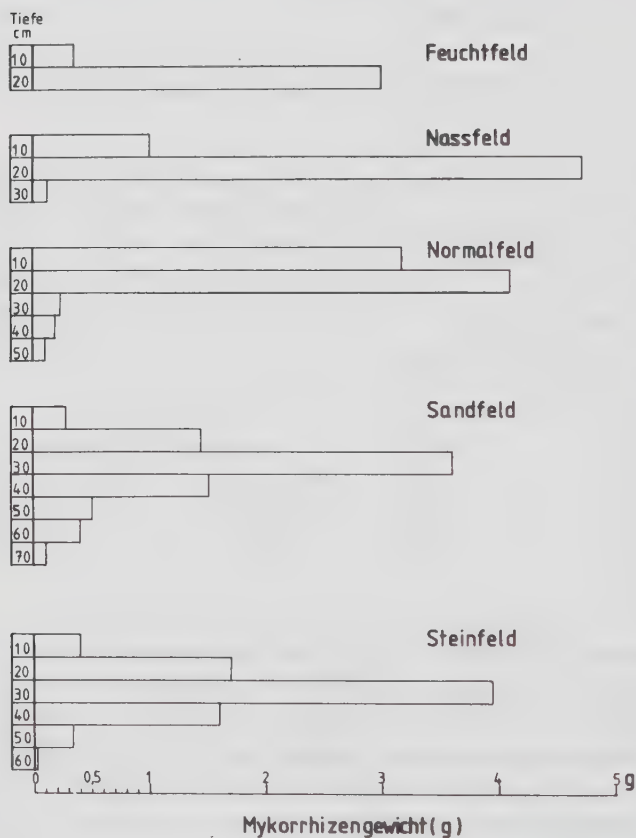


Abb. 47: Tiefenstufenbezogene Mykorrhizengewichtsbildung auf allen fünf Prüffeldern

Belastung der Prüffelder eine Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung feststellen: Auf dem Feuchtfeld liegt das erste Gewichtsminimum in der 10 und 20 cm - Tiefenstufe bei 3,37 Gramm. Auf dem Sandfeld mit 7 Tiefenstufen von 10 bis 70 cm liegt das Maximum bei 8,99 Gramm und auf dem Steinfeld mit 6 Tiefenstufen bei 8,02 Gramm.

Das u. E. Bedeutsame an dieser Feststellung ist dies, daß zwar ganz allgemein in der Organausbildung die Erle auf dem Steinfeld vergleichsweise zum Sandfeld zurückgeht, somit auch im Hinblick auf das Vordringen der Wurzel in die tiefste Tiefenstufe (auf dem Sandfeld bis 70 cm und auf dem Steinfeld nur bis 60 cm), daß aber die Erle trotz Organverkleinerung auf dem ökologisch belasteten Steinfeld die Mykorrhizenbildung gewichtsmäßig sogar steigert, und zwar vom Sandfeld zum Steinfeld um 0,35 Gramm, was in der Tiefenstufe von 30 cm einer Mykorrhizenvermehrung um 59,5 Bakterienknöllchen entspricht. Die numerischen Werte zu den Graphika der Abb. 47 sind in Tab. 5 zusammengestellt, in der nicht nur die absolute, sondern auch die prozentuale Gewichtsverteilung der Mykorrhizen eingetragen ist.

Feld	Tiefe/cm							Gesamt- gewicht (g)	Prozent
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm		
Feuchtfeld	0,35	3,02	-	-	-	-	-	3,37	37 %
Nassfeld	1,01	4,73	0,12	-	-	-	-	5,86	65 %
Normalfeld	3,18	4,11	0,22	0,19	0,10	-	-	7,80	87 %
Sandfeld	1,45	1,42	3,60	1,51	0,51	0,40	0,10	8,99	100 %
Steinfeld	0,40	1,70	3,95	1,60	0,05	0,32	-	8,02	89 %

Tab. 5: Zusammenstellung der numerischen Mykorrhizengewichtswerte (Gramm), welche zu den Graphikas der Abb. 47 gehören

I. Wurzeldurchdringungsgrad (WDdG)

In Abb. 48 sind zwei Darstellungen zu sehen: Rechts oben sind die Gesamtüberkreuzungshäufigkeiten als Absolutwerte in Form eines Balkendiagramms dargestellt. Wir erkennen recht deutlich mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder eine Minimum-Maximum-Minimum-Bewegung: Das erste Minimum findet sich auf dem Feuchtfeld mit einer Häufigkeit von 161 Überkreuzungen. Das Maximum findet sich auf dem Naßfeld mit einer Häufigkeit von 520 Überkreuzungen. Das zweite Minimum mit einer Häufigkeit von 124 Überkreuzungen auf dem Steinfeld.

Im Graphikum der Abb. 48 links unten sind die Überkreuzungshäufigkeiten nach Tiefenstufen aufgegliedert. Hier fällt allgemein auf, daß auf allen Prüffeldern die größte Überkreuzungshäufigkeit sich im Bereich der drei obersten Tiefenstufen abspielt. Dies ist insofern nicht verwunderlich, weil die bei der Überkreuzung mitbeteiligte Fichtenwurzel sich hauptsächlich in eben diesen drei obersten Tiefenstufen von 10, 20 und 30 cm Tiefe ausbreitete, wie dies an vielen anderen Wurzelkriterien: Der Wurzelzahl, Wurzellänge, des Wurzel-trockengewichts, Wurzelvolumens und der Wurzeldichte erkannt wurde und wie dies auch aus den Graphikas der Abb. 37 und 40 bis 46 zu erkennen ist.

Dadurch, daß die Fichte ihre Hauptwurzelmassen hauptsächlich unter der Bodenoberfläche, aber weniger oder überhaupt nicht in größere Tiefe ausgebreitet hatte, konnten sich naturgemäß die häufigsten Wurzelüberkreuzungen mit der Erlenwurzel nur in den obersten Tiefenstufen abspielen.

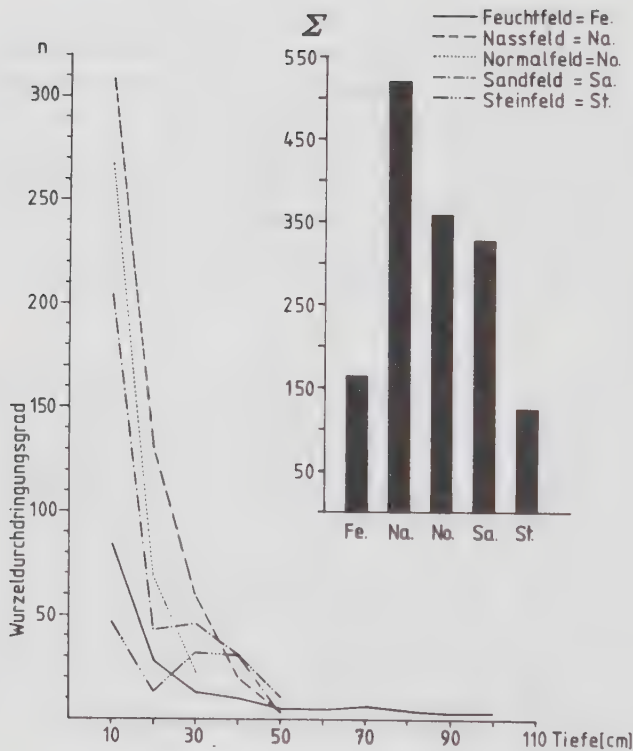


Abb. 48: Angaben über die Wurzeldurchdringungsgrade bzw. -überkreuzungshäufigkeiten: links unten tiefenstufenbezogene Werte, rechts oben Absolutwerte auf allen fünf Prüffeldern

Dadurch, daß das Naßfeld für beide Wurzeln,gleichermaßen der Fichte und der Erle,das physiologisch flachgründigste Prüffeld war, in dem sowohl die Fichte,als auch die Erle ihre Hauptwurzelmassen in die obersten Tiefenstufen aus-sandten, ist es erklärlich, daß die dort nahezu auf gleicher Bodentiefenstufe ausgebildeten Wurzeln zu den allermeisten Überkreuzungshäufigkeiten führten.

So fanden wir mit der Überkreuzungshäufigkeit bzw. dem Wurzeldurchdringungsgrad ein recht brauchbares Kriterium, das uns Auskunft darüber erteilt, inwieweit die physiologische Flach- oder Tiefgründigkeit eines von einem Mischbestand bestockten Standortes ausgebildet ist. Dadurch,daß die Überkreuzungshäufigkeiten bzw. die Ausmaße des Wurzeldurchdringungsgrades durch tiefenstufenbezogene Zählungen zustande kommen, fanden wir ein brauchbares, numerisch ausdrückbares Kriterium hierfür. In Tab. 6 sind die numerischen Zahlen zusammengestellt: Auf der Ordinate finden sich die Zahlen für das Graphikum der Abb. 48 links unten und auf der Abszisse (Zahlen unter dem Schlußstrich) finden sich die Zahlen, die die Unterlagen für das Balkendiagramm der Abb. 48 rechts oben abgaben.

Tiefe/cm	Feuchtfeld	Nassfeld	Normalfeld	Sandfeld	Steinfeld
10	84	309	268	204	47
20	28	129	68	43	13
30	13	59	23	46	32
40	10	20	-	31	31
50	5	3	-	3	11
60	5	-	-	-	-
70	6	-	-	-	-
80	4	-	-	-	-
90	3	-	-	-	-
über 100	3	-	-	-	-
Gesamt	161	520	359	327	134

Tab. 6: Zusammenstellung der numerischen Wurzeldurchdringungsgrade bzw. -überkreuzungshäufigkeitswerte, welche zu den Graphikas der Abb. 48 gehören

3. Die Vergleichsbefunde zwischen dem Wurzelvolumen der Fichten und Erlen und dem Volumen ihrer oberirdischen Sproßachsensysteme

Alle in den vergangenen Kapiteln graphisch und numerisch mitgeteilten Werte sind Wurzelkriteriumswerte. Um einen Vergleich zwischen dem unter- und oberirdischen Sproßachsensystem ziehen zu können, nahmen wir uns das vergleichbare Kriterium des Volumens vor und verglichen somit die Volumenverhältnisse von Fichte (Abb. 49) und Erle (Abb. 50).

Diese beiden Abbildungen sind graphisch einheitlich gehalten: Im unteren Graphikum der Abb. 49 sind über der Abszisse in Form von Balken die oberirdischen Sproßachsenvolumina und unterhalb dessen die Wurzelvolumina der Fichte aufgetragen und zwar in Form von Absolutwerten (ausgedrückt in cm^3). Über dem Graphikum der Abb. 49 ist ein zweites Graphikum mit Angaben über die Relativwerte zu erkennen, also über die Prozentwerte, wobei in Form eines Balkendiagramms der prozentuale Anteil des Wurzelvolumens vergleichsweise zu dem des oberirdischen Sproßachsensystems aufgetragen ist.

In Abb. 50 ist eine analoge Darstellung für die Erlenverhältnisse aufgezeichnet.

Wir erkennen bei dem Vergleich der Abb. 49 und 50 zunächst den wesentlichen Unterschied, daß die Fichte weitaus kleinere Wurzel- und oberirdische Sproßachsenvolumina, im Gegensatz zur Erle ausgebildet hatte.

Weiterhin ist die Verteilung der Volumina auf den einzelnen Prüffeldern verschieden.

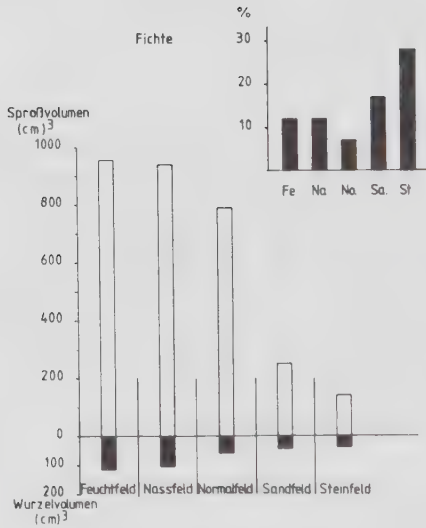


Abb. 49: Absolute und relative Wurzelvolumenangaben der unter- und oberirdischen Sproßachsen-systeme bei den Fichten in den Mischparzellen auf allen fünf Prüffeldern

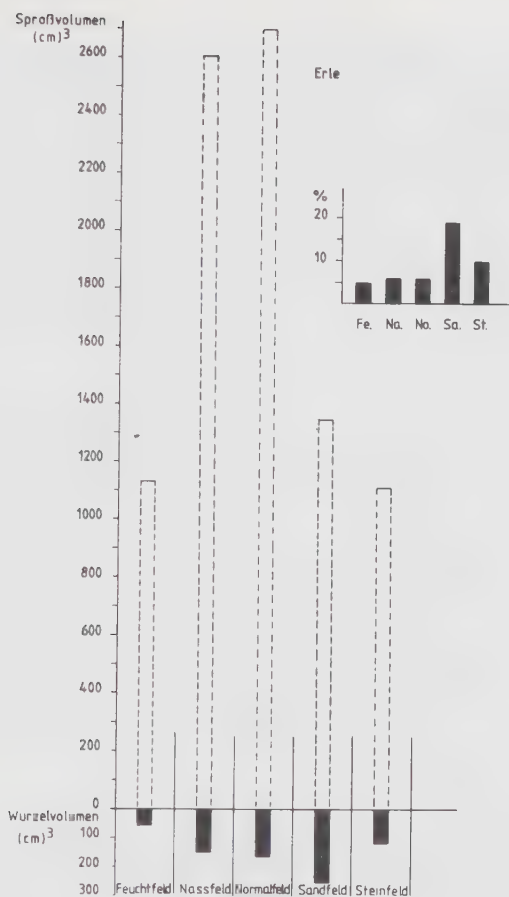


Abb. 50: Absolute und relative Wurzelvolumenangaben der unter- und oberirdischen Sproßachsen-systeme bei den Erlen in den Mischparzellen auf allen fünf Prüf-feldern

Wir betrachten zunächst die Volumenbildung der Fichte (Abb. 49): Wir erkennen bei den Absolutwerten der oberirdischen Sproßachsensysteme eine Maximum-Minimum-Bewegung, wobei in der Reihenfolge der Prüffelder Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld das Maximum auf dem Feuchtfeld und das Minimum auf dem Steinfeld zu finden ist. Eine ganz ähnliche Maximum-Minimum-Entwicklung konnte auch bei den Absolutvoluminawerten der Wurzeln festgestellt werden: Auch bei dem Feuchtfeld bildete sich das größte Volumen und auf dem Steinfeld das geringste Wurzelvolumen aus.

Wenn der prozentuale Anteil der Wurzel vergleichsweise zum oberirdischen Sproßachsensystem errechnet wird (Abb. 49 rechts oben), so ergibt sich bei der Fichte eine Maximum-Minimum-Maximum-Bewegung: In der Reihenfolge der Prüffelder Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld, Steinfeld bildete sich sowohl auf dem Feuchtfeld, als auch auf dem Naßfeld ein Maximum heraus in Höhe von 12 % Wurzelvolumen vergleichsweise zum Volumen der oberirdischen Sproßachsensysteme. Das Minimum wurde auf dem Normalfeld mit 7 % erreicht. Nach dem Normalfeld stieg nun der Prozentwert bis zu einem Maximum von 28 % auf dem Steinfeld an.

Die Volumenverhältnisse der Erle (Abb. 50) sind vergleichsweise zur Fichte gänzlich anders: Dort finden wir eine Minimum-Maximum-Minimum-Bewegung sowohl bei den Wurzeln, als auch bei den oberirdischen Sproßachsensystemen: Die Minima bildeten sich gleichermaßen auf dem Feucht- und Steinfeld aus, doch waren die Maxima bei der Wurzel und den oberirdischen Sproßachsensystemen auf verschiedene Prüffelder verlagert: Das Maximum des oberirdischen Sproßachsensystems bildeten sich auf dem Normalfeld und das Maximum der Wurzel auf dem Sandfeld heraus.

Da nun gleichermaßen sowohl bei dem oberirdischen, als auch bei dem unterirdischen Sproßachsensystem über die verschiedenen Prüffelder hinweg eine Minimum-Maximum-Minimum-Bewegung festzustellen ist, bildete sich auch bei dem Relativverhältnis (Angaben der Wurzelvolumina vergleichsweise zu den oberirdischen Sproßachsensystemen in Prozent) eine gleiche Bewegung: Das Minimum wurde gebildet auf dem Feuchtfeld, das Maximum auf dem Sandfeld und das Minimum wiederum auf dem am stärksten ökologisch belasteten Steinfeld.

In Tab. 7 sind die numerischen Daten zu den Graphikas der Abb. 49 und 50 dargestellt.

Feld	Sproßvolumen cm ³		Wurzelvolumen cm ³		prozentualer Wurzelvolumenanteil v. Sproßvolumen	
	Fichte	Erle	Fichte	Erle	Fichte	Erle
Feuchttfeld	951	1128	112,55	59,99	12	5
Naßfeld	941	2608	109,60	148,40	12	6
Normalfeld	791	2698	58,00	165,90	7	6
Sandfeld	253	1346	43,70	253,00	17	19
Steinfeld	148	1109	42,10	116,40	28	10

Tab. 7: Zusammenstellung der numerischen Volumenangaben, welche zu den Graphikas der Abb. 49 und 50 gehören

4. Vergleichsbefunde von Fichtenwurzelkriterien,
die nach den Versuchsanordnungen mit Hilfe der
Plexiglasplattenmethode nach BARNER und der
Kastenmethode erhoben worden sind

Bereits im methodischen Teil wurde ausführlich dargelegt, daß die in dieser Arbeit neu entwickelte Kastenmethode weitaus ausführlichere Ergebnisse zu bieten vermag, als die Plexiglasplattenmethode nach BARNER, weil die Kastenmethode den gesamten von Wurzeln durchzogenen Bodenblock erfaßt. Die Plexiglasplattenmethode erfaßt lediglich zweidimensional die aus der Wand des Boden- und Wurzelprofils heraustretenden Wurzeln, wobei bei dieser Methode nur die mehr waagrecht verlaufenden Wurzeln, nicht aber die senkrecht verlaufenden Wurzeln erfaßt werden können.

Doch angesichts dieser zwangsläufig unterschiedlichen Genauigkeit in der Erfassung der Wurzeln soll wenigstens doch ein Vergleich von Wurzelkriteriumsergebnissen mit beiden Methoden gezogen werden, sofern sie gleiche Wurzelkriterien zu erfassen imstande sind: Dies ist einmal die Wurzelzahl (Abb. 51), zum anderen der Wurzelausnützungsgrad (Abb. 52). Außerdem die Wurzeltiefe (Abb. 53 b) und zuletzt der Wurzeldurchmesser (Abb. 53 a).

In den Graphikas der Abb. 51 bis 53 sind oberhalb der Abszissenachse die Werte in Form von Balkendiagrammen nach der genaueren Kastenmethode und unterhalb entsprechend die Werte nach der weniger genauen Plexiglasplattenmethode aufgetragen.

A. Im Hinblick auf die Wurzelzahl

Im Hinblick auf die Erfassung der Wurzelzahl ergibt sich eine gewisse Gleichläufigkeit der Trendwerte: Bei der Wurzelzahl in der Reihenfolge der Prüffelder Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld eine Maximum-Minimum-Bewegung, wobei der Trendverlauf bei Ermittlung nach der Kastenmethode wesentlich ausgeprägter und steiler ausgestaltet ist, als bei der Ermittlung nach der Plexiglasplattenmethode. Die Unterschiedlichkeit des Trends bei beiden Methoden ist eben darin zu suchen, daß mit Hilfe der Kastenmethode wesentlich mehr Wurzeln erfaßt werden können, als bei der Plexiglasplattenmethode (Abb. 51).

B. Im Hinblick auf den Wurzelausnützungsgrad

Obwohl bei der Berechnung des Wurzelausnützungsgrades bei der Plexiglasplattenmethode und bei der Kastenmethode rechnerisch verschieden vorgegangen werden mußte (es wird hierbei auf die methodischen Kapitel II. 2. A. f) und II. 2. B. f) verwiesen), konnte doch bei vergleichender Auswertung beider Methoden (Abb. 52) ein ähnlicher Trendverlauf in Form einer Minimum-Maximum-Bewegung festgestellt werden: Mit den geringsten Werten auf dem Feuchtfeld und mit den höchsten Werten auf dem Steinfeld. Die Werte nach der Plexiglasplattenmethode nahmen stärker zu, als nach der Kastenmethode. Die Unterschiedlichkeit resultiert einmal aus der Unterschiedlichkeit der Wurzelzahlen, wobei mit Hilfe der Kastenmethode mehr Wurzelzahlen

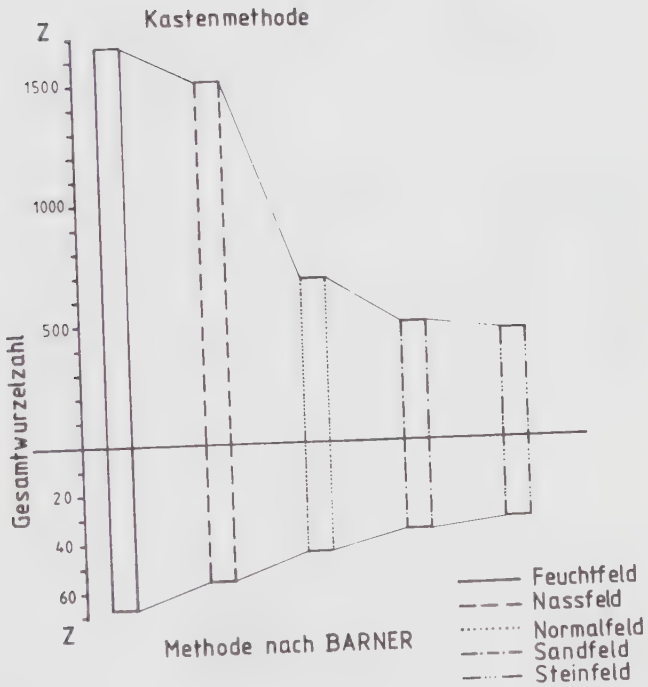


Abb. 51: Vergleichende Bestimmung der Gesamtwurzelzahl mit Hilfe der Methode BARNER und der Kastenmethode auf allen fünf Prüffeldern

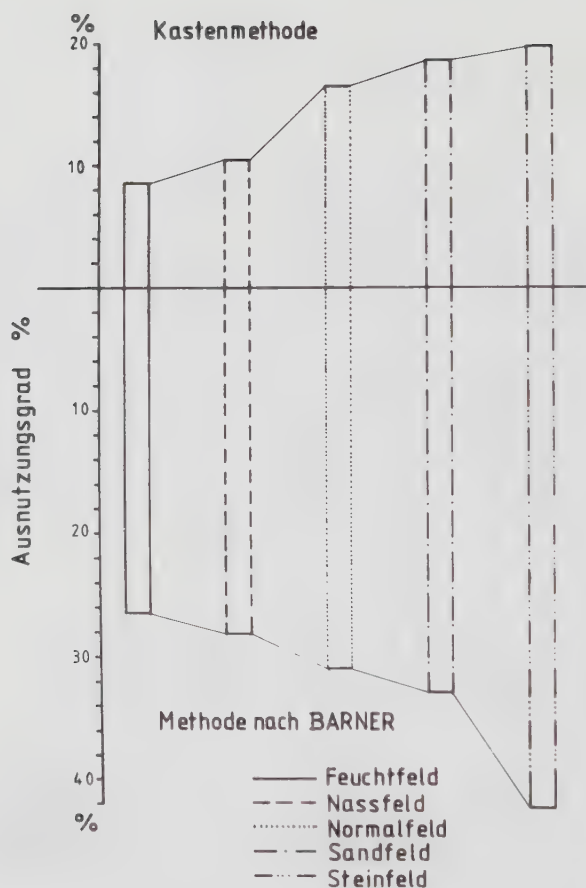


Abb. 52: Vergleichende Bestimmung des Wurzel-
 ausnutzungsgrades mit Hilfe der
 Methode BARNER und nach der Kasten-
 methode auf allen fünf Prüffeldern

ermittelt werden können als mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode. Sowohl bei der Plexiglasplattenmethode als auch bei der Kastenmethode steht die Wurzelzahl im Nenner des Quotienten. Aber auch der Zähler des Quotienten liegt bei beiden Berechnungsmethoden verschieden hoch: Bei der Plexiglasplattenmethode wird bei der Berechnung der theoretischen Abstandssumme die Zahl 100 und bei der Kastenmethode die Zahl 1000 eingetragen.

Bei Anwendung der Plexiglasplattenmethode betrug die Wurzelzahl im Nenner des Wurzelausdrucks auf allen 5 Prüffeldern unter 100, also unter dem Zählerwert. Bei der Kastenmethode betrug die Wurzelzahl je nach Prüffeld unter und auch über dem Zählerwert von 1000. Infolgedessen errechneten sich bei der Berechnung des Wurzel ausnützungsgrades nach der Kastenmethode durchweg geringere Prozentwerte als bei der Plexiglasplattenmethode.

C. Im Hinblick auf die Wurzeldurchmesser

Hier ergaben beide Methoden eine unterschiedliche Trendentwicklung (Abb. 53 a): Bei der Plexiglasplattenmethode nach BARNER eine Maximum - Minimum - Bewegung und bei der Kastenmethode eine Minimum - Maximum - Bewegung, die jedoch wesentlich weniger ausgeprägt verläuft als die mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode gewonnene Maximum - Minimum - Bewegung.

Dieser Unterschied resultiert aus der Tatsache, daß bei der Plexiglasplattenmethode weitgehend die horizontal verlaufenden Grobwurzeln erfaßt werden, während nach der Kastenmethode

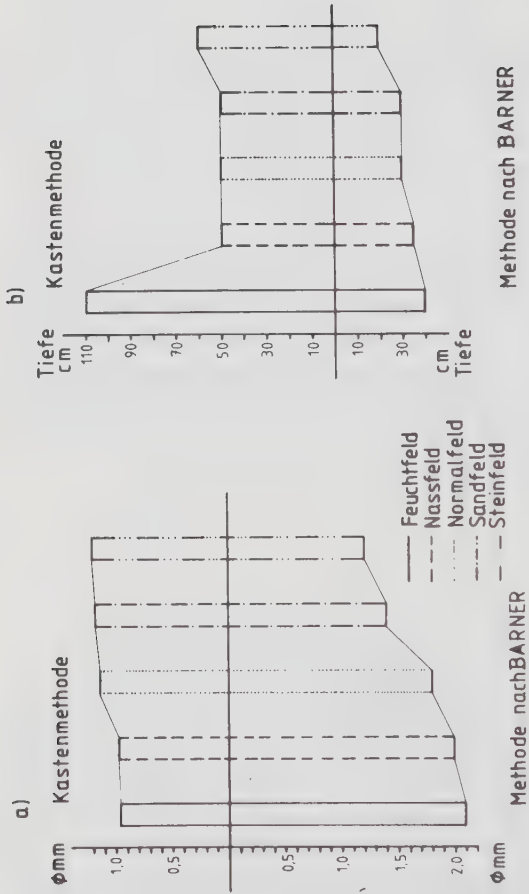


Abb. 53: a = Vergleichende Bestimmung des Wurzeldurchmessers
b = Vergleichende Bestimmung der Wurzeltiefen
mit Hilfe der Methode BARNER und der Kastenmethode
auf allen fünf Prüffeldern

nicht nur alle Grobwurzeln, sondern auch die vertikal verlaufenden Feinwurzeln voll miterfaßt werden.

Als Ergebnis läßt sich somit festhalten, daß man in gewissen Grenzen sowohl mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode als auch mit Hilfe der Kastenmethode unter verschiedenen ökologischen Bedingungen, in unserem Fall unter verschiedenen Prüffeldbedingungen, wohl zu einigermaßen vergleichbaren Werten, bzw. Trendverläufen bei der Bestimmung der Wurzelzahlen und des Wurzelausnützungsgrades kommen kann (siehe hierzu die Ergebnisse der vergangenen Kapitel II,4 a und b), daß man jedoch zu keinen vergleichbaren Wurzeldurchmesserwerten kommen kann.

D. Im Hinblick auf die Wurzeltiefe

Hier ergab sich eine ungefähre Gleichläufigkeit in Form einer Maximum - Minimum - Bewegung bei Anwendung beider Methoden, wobei der Trend bei Anwendung der Plexiglasplattenmethode weniger ausgeprägt ist (Abb. 53 b) als bei Anwendung der Kastenmethode. Vor allem konnte auf dem Feuchtfeld mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode nicht das Tiefenmaximum von 110 cm nachgewiesen werden, wozu die Kastenmethode imstande ist. Das mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode feststellbare Tiefenmaximum reichte nur bis 35 cm Tiefe.

Bei unserer Untersuchung kam noch der Nachteil hinzu, daß wir bei Anwendung der Plexiglasplattenmethode ein kleineres Untersuchungsgut hatten: Den Werten nach der Plexiglasplattenmethode lagen nur die Werte einer einzigen Fichtenpflanze zu

Grunde. Den Werten nach der Kastenmethode lagen die Mittelwerte von 4 Fichtenpflanzen zu Grunde.

Während also bei Anwendung der Kastenmethode bei der Berechnung der Wurzelzahl, des Wurzelausnützungsgrades, des Wurzeldurchmessers und der Wurzeltiefe 4 wurzelmorphologisch gleichwertige Fichten zur Verfügung standen, stand bei Anwendung der Plexiglasplattenmethode nur eine einzige Fichte zur Verfügung. Aber selbst die 4 in ihrer Wurzelmorphologie ungefähr gleichwertigen Fichtenwurzeln waren in ihren genau erhobenen Dimensionen recht verschieden, wie aus der Tabelle 8 hervorgeht, in der die Wurzelgesamtzahlen (Grobwurzeln und Feinwurzeln) aufgeführt sind und aus der zu ersehen ist, bis in welche Bodentiefen die Wurzelgesamtzahlen sich erstreckten: So ist u.a. aus der Tabelle zu ersehen, daß die Fichte Nr. 1 auf dem Steinfeld nur bis 60 cm, die Fichte Nr. 2 bis 40 cm, die Fichte Nr. 3 bis 50 cm und die Fichte Nr. 4 wiederum bis zur Tiefenstufe von 60 cm vordringen konnte, was nicht sonderlich verwundert, weil eben die Beschaffenheit der verschieden großen Steine nur eine verschiedene Bodendurchdringungsmöglichkeit der Wurzeln zuließ.

Ein ähnliches Bild finden wir auch auf dem Feuchtfeld: Dort drangen die Fichten Nr. 1, 2 und 4 bis zu einer Tiefenstufe von 90 cm vor, hingegen konnte die Fichte Nr. 3 bis zu einer Tiefenstufe von 110 cm vordringen. Ein ähnliches Bild können wir auf dem Normalfeld feststellen.

Eben der Umstand des unterschiedlich umfangreichen Untersuchungsgutes (bei Anwendung der Kastenmethode standen 4 Fichten, bei Anwendung der Plexiglasplattenmethode stand nur 1 Fichte zur Verfügung) führte zu den unterschiedlichen Ergebnissen, bzw. zu den prüffeldspezifischen Trendverläufen der ermittelten Kurven. Immerhin konnten wir wenigstens bei der Erfassung

Tiefe cm	Feuchtfeld				Naßfeld				Normalfeld				Sandfeld				Steinfeld								
	F1 1	F1 2	F1 3	F1 4	MWZ	F1 1	F1 2	F1 3	F1 4	MWZ	F1 1	F1 2	F1 3	F1 4	MWZ	F1 1	F1 2	F1 3	F1 4	MWZ	F1 1	F1 2	F1 3	F1 4	MWZ
10	807	800	623	472	701	702	774	576	630	671	865	141	320	207	337	186	154	237	199	194	146	61	135	92	120
20	409	310	399	562	420	434	405	565	502	454	141	260	130	176	177	180	118	170	270	185	173	227	131	156	172
30	212	109	292	360	243	208	228	318	199	238	59	175	17	155	102	38	27	36	48	54	78	74	91	79	81
40	181	94	138	56	117	118	98	112	154	121	1	86	4	52	36	36	24	41	37	34	69	31	38	52	48
50	73	61	61	53	62	66	30	1	16	28	-	28	-	34	31	11	7	5	14	9	15	-	23	33	24
60	28	19	36	83	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16	-	-	11	13
70	20	21	60	31	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	8	13	38	22	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	1	8	18	15	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
über 100	-	-	10	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gesamt	1732	1335	1675	1644	1658	1528	1535	1572	1501	1512	666	890	471	624	683	451	330	489	568	481	499	413	418	423	452

Tab. 8: Angaben über die Gesamtwurzelzahlen (Grob- und Feinwurzeln) der mit der Kastenmethode untersuchten vier Fichten in den einzelnen Tiefenstufen auf allen fünf Prüffeldern

+ Tiefe bis 110 cm

der Wurzelzahlen, der Wurzelausnützungsgrade und der Wurzeltiefen mit beiden Methoden gleichgerichtete Trendverläufe erhalten, jedoch bei der Erfassung der Wurzeldurchmesser nicht. Die Gründe hierfür sind angegeben: Die Plexiglasplattenmethode kann eben nur das Wurzelsystem partiell erfassen, während die Kastenmethode das Wurzelsystem weitgehend ganz erfassen kann.

5. Die nach BARNER und GROSSKOPF mit Hilfe
der Kastenmethode bestimmten Feinwurzel-
intensitäten

Bereits GROSSKOPF (1950) befaßte sich mit der Bestimmung der Feinwurzelintensität und definierte sie bei Anwendung seiner Block-Methode als die Längensumme aller Feinwurzeln je Liter Boden.

BARNER griff im Zuge der Entwicklung seiner Plexiglasplattenmethode die Möglichkeit der Feinwurzelbestimmung im Jahre 1965 auf und definierte sie, weil es sich bei Anwendung der Plexiglasplattenmethode um eine flächenmäßige Erfassung des Wurzel- und Bodenprofils handelte, anders: Nach BARNER (1965) besteht die Feinwurzelintensität aus der Anzahl aller Feinwurzeln je 100 cm^2 Flächeneinheit Plexiglasplattenoberfläche.

ZETTEL überprüfte in seiner Dissertation im Jahre 1971 die Frage, inwieweit die Größe der Feinwurzelintensität nach GROSSKOPF (1950) und BARNER (1965) gegenseitig ersetzt werden könne und ob in den einzelnen Tiefenstufen gleiche Trendverläufe der auf verschiedene Art und Weise gewonnenen Daten sich ergäben und unternahm diese Überprüfung an der Holzart Fichte auf 4 verschiedenen Standorten des nördlichen Oberschwabens mit 4 verschiedenen Böden (Braunerde, mäßiger Pseudogley, Pseudogley und starker Pseudogley) bei Anwendung beider Bestimmungsmethoden. In Abb. 19 der Dissertation ZETTEL (1971) ist die tiefenstufenbezogene graphische Auswertung nachzusehen: Sie ergab eine vollständige Gleichläufigkeit der Feinwurzelintensitätsdaten und erbrachte damit den ersten Nachweis, daß man die an sich sehr arbeitsintensive Feinwurzel-

bestimmungsmethode von GROSSKOPF (1950) durch die weitaus weniger arbeitsintensive Methode BARNER (1965), die ja nur einer einfachen Auszählung bedarf, ersetzen könne, um zu den gleichen tiefenstufenbezogenen Relationen zu kommen.

Wir hatten nun die Gelegenheit, mit Hilfe unserer Kastenmethode das methodische Vorgehen von ZETTEL (1971) zu reproduzieren, indem wir auch einmal die tiefenstufenbezogenen Wurzellängensummen je Liter Boden und zum anderen die Wurzelzahlen bestimmen konnten, wobei wir bei Anwendung der Kastenmethode die Wurzelzahlen genauso wie GROSSKOPF je Liter Boden bestimmten. Wir werteten nicht nur, wie ZETTEL (1971) aus, sondern übernahmen auch von ihm seine graphische Darstellungsweise (Abb. 19 seiner Dissertation), wie sie in den Graphika der Abb. 54 - 58 zu erkennen ist und fanden auch wie er eine vollkommene Gleichläufigkeit, ja geradezu eine Spiegelbildlichkeit der Trendverläufe, so daß wir zunächst aus diesem methodischen Ergebnis ableiten können, daß in der Tat die Feinwurzelintensität gleichermaßen nach der Methode GROSSKOPF (1950) und BARNER (1965) abgeleitet werden kann, so wie dies ZETTEL (1971) schon ausführlich tat, was uns auch als eine gewisse Bestätigung für das zulässige methodische Vorgehen von ZETTEL (1971) galt.

Was unsere mit beiden Methoden gleich gut gefundenen Ergebnisse anbetrifft, so ist zu ihnen folgendes zu sagen: In den Abb. 54 und 58 dominieren die Feinwurzeln der Fichte auf dem Feucht- und Naßfeld eindeutig über diejenigen der Erle. Hingegen auf den folgenden ökologisch stärker belasteten Feldern Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld (Abb. 56 - 58) dominieren eindeutig die Feinwurzelintensitäten der Erle über denjenigen der Fichte.

Bei dem Normalfeld (Graphikum der Abb. 56) kommt auch recht

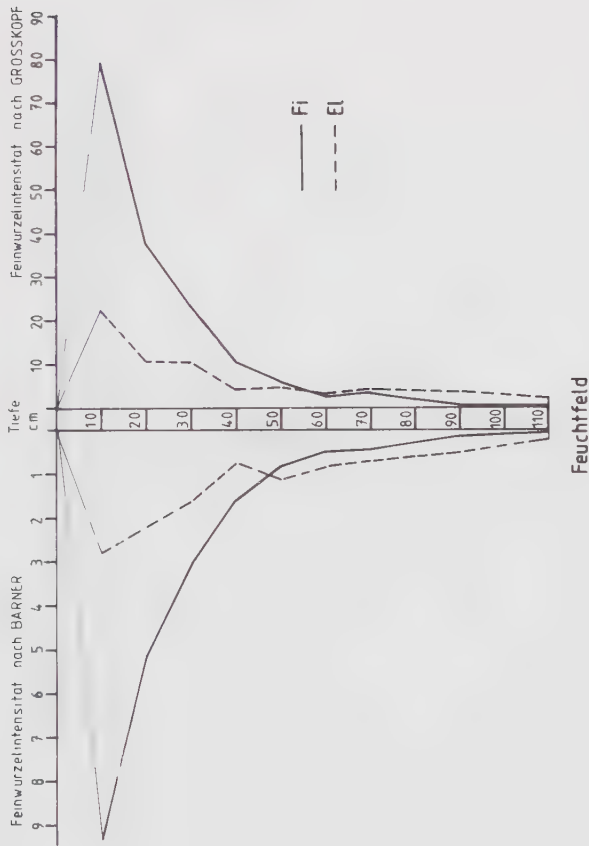


Abb. 54: Vergleich der Feinwurzelintensitätsergebnisse nach BARNER (Zahl der Feinwurzeln je Liter Boden) und GROSSKOPF (Längensumme der Feinwurzeln je Liter Boden) auf dem Feuchtfeld

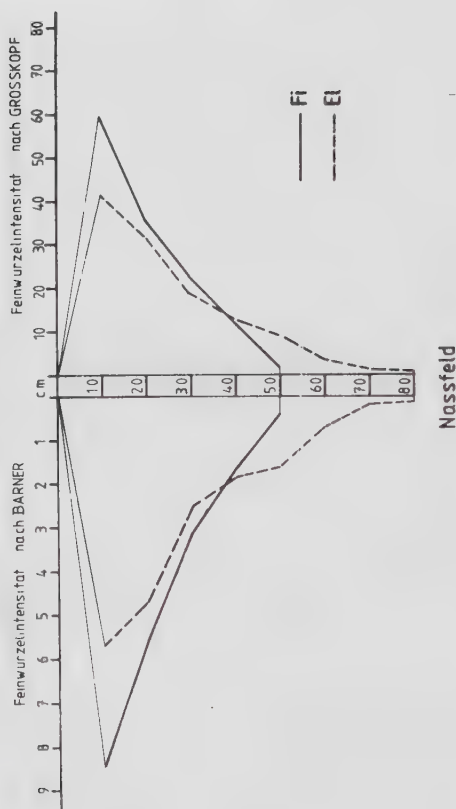


Abb. 55: Vergleich der Feinwurzelintensitätsergebnisse nach BARNER (Zahl der Feinwurzeln je Liter Boden) und GROSSKOPF (Längensumme der Feinwurzeln je Liter Boden) auf dem Nassfeld

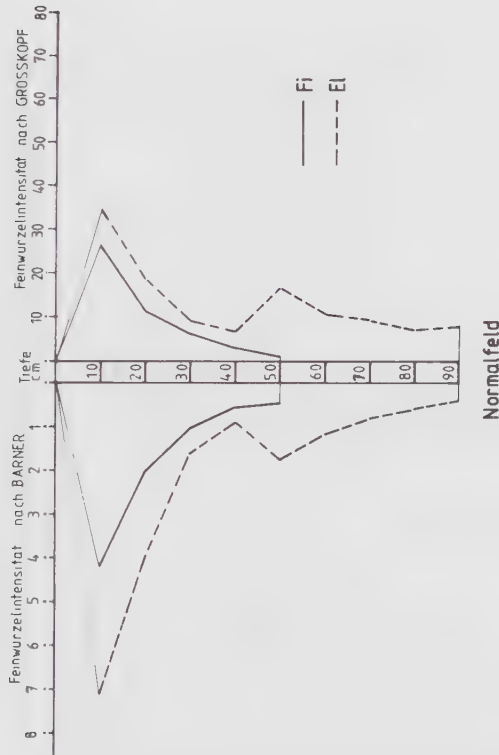


Abb. 56: Vergleich der Feinwurzelintensitätsergebnisse nach BARNER (Zahl der Feinwurzeln je Liter Boden) und GROSSKOPF (Längensumme der Feinwurzeln je Liter Boden) auf dem Normalfeld

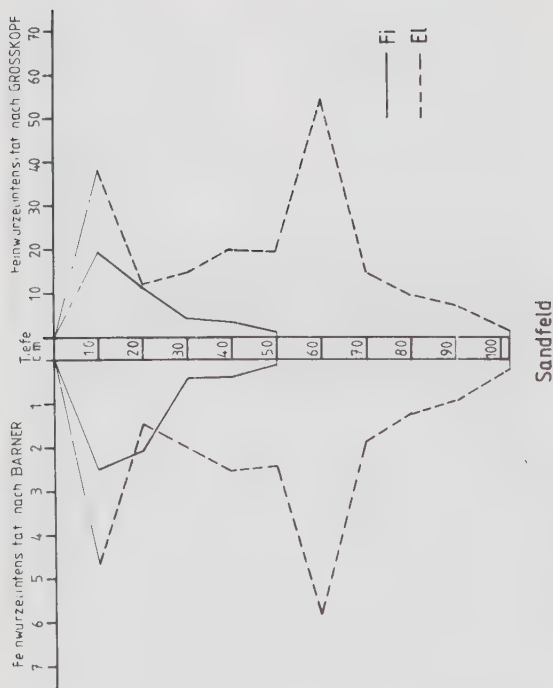


Abb. 57: Vergleich der Feinwurzelintensitätsergebnisse nach BARNER (Zahl der Feinwurzeln je Liter Boden) und GROSSKOPF (Längensumme der Feinwurzeln je Liter Boden) auf dem Sandfeld

deutlich bei der Feinwurzelintensitätsausbildung die schon früher öfters erwähnte Zweistöckigkeit des Erlenwurzelsystems zum Ausdruck mit einem Maximum im Bereich der Tiefenstufe von 10 cm und einem kleineren Maximum im Bereich der Tiefenstufe von 50 cm. Die bereits ebenso oft erwähnte Unterschiedlichkeit der Tiefenerschließung von Fichte und Erle ist auch bei diesem Graphikum zu erkennen: Die Fichte reichte auf dem Normalfeld bis zur Tiefenstufe von 50 cm und die Erle bis zu einer Tiefenstufe von 90 cm.

Ein fast noch ausgeprägteres Bild der Feinwurzelintensitätsbildung bietet das Graphikum der Abb. 57: Der einzige wesentliche Unterschied zwischen Abb. 56 und 57 besteht darin, daß das zweite Maximum der Erlenfeinwurzelintensität in der Tiefe von 60 cm stärker ausgebildet ist als das erste Maximum in der Tiefe von 10 cm. Außerdem reicht die Tiefenerschließung der Erlenfeinwurzeln auf dem Sandfeld weiter als auf dem Normalfeld: Sie reicht dort bis zur Tiefe von 102 cm.

6. Synoptischer Vergleich der wichtigsten wurzel-
morphometrischen Befunde von Fichte und Erle
mit Hilfe der Darstellung von Stufenkoordina-
tensystemen

Nachdem nun in den Kapiteln III. 1 - 5 alle von uns erhobenen wurzelmorphometrischen Kriterien hauptsächlich in Einzelwerten dargestellt worden sind, bedarf es nunmehr zuletzt eines synoptischen Vergleichs wenigstens der wichtigsten wurzelmorphometrischen Mittelwerte, um nochmals den grundlegenden Unterschied zwischen der Ausbildung der Fichten- und Erlenwurzel deutlich zu machen.

Zu diesem Vergleich verwandten wir die von BARNER (1965) konzipierten Stufenkoordinatensysteme und brachten mit ihnen vergleichend nachstehende Wurzelkriterien auf folgende Art und Weise zur Darstellung: Von der Abszissenachse des Stufenkoordinatensystems aus wurden einmal nach oben die mittleren Wurzeldurchmesser (WM. $\emptyset$ mm), die mittlere Wurzelkreisfläche (WKf.M $\emptyset$ mm²), die Gesamtwurzelzahl (GWZ), die Zahl der Feinwurzeln (FWZ), das gesamte Wurzeltrockengewicht (WG g), die gesamte Wurzellänge (WL cm) und das Wurzelvolumen (WV cm³) in Form von Strecken aufgetragen, und zwar in der Weise, daß die Strecken aller soeben genannten Wurzelkriterien nicht senkrecht nach oben, sondern jeweils im Winkel von 45° abgesetzt eingezeichnet worden sind.

In ähnlicher Weise wurde von der Abszissenachse aus nach unten ein weiteres Kriterium senkrecht nach unten aufgetragen, und zwar die Wurzeltiefe (WT cm).

Wenn wir zunächst die so ausgewerteten Stufenkoordinatensysteme der Fichte in Abb. 59 und der Erle in Abb. 60 miteinander vergleichen, so sehen wir an Hand des von den beiden Stufenkoordinatensystemen umschriebenen Gesamtkörpers, daß die Erlenwurzel (Abb. 60) weitaus größere Ausmaße in allen Wurzelkriterien ausbildete als die Fichte (Abb. 59).

Wir erkennen aber auch im Hinblick auf die feldspezifischen Größenordnungen der einzelnen Kriterien in der Reihenfolge der ökologisch zunehmend belasteten Prüffelder Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld eine grundlegend unterschiedliche Bewegung: Fast alle Kriterien der Erlenwurzeln folgten einer Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung. Fast alle Kriterien der Fichtenwurzeln folgten einer Maximum - Minimum - Bewegung. Doch kann dies nicht ausschließlich für alle Kriterien behauptet werden. Einzelne Kriterien wiesen einen anderen Trend auf. Aus diesem Grund müßten wir die Ergebnisse der Stufenkoordinatenauswertung von Abb. 59 und 60 genauer analysieren:

Bei der Fichtenwurzel (Abb. 59) folgten folgende Kriterien einer Maximum - Minimum - Bewegung, wobei das Maximum auf dem Feuchtfeld und das Minimum auf dem Steinfeld vorzufinden waren: Wurzelvolumen, Wurzellänge, Wurzelgewicht, Feinwurzelzahl und die Gesamtwurzelzahl.

Außer diesen Kriterien folgten zwei andere Kriterien in einer jedoch nur wenig ausgeprägten Minimum - Maximum - Bewegung: Diese sind die mittlere Wurzelkreisfläche und der mittlere Wurzeldurchmesser, wobei das Minimum auf dem Feuchtfeld und das Maximum auf dem am stärksten ökologisch belasteten Steinfeld anzutreffen war.

Bei der Fichte gab es jedoch noch ein wichtiges Kriterium,

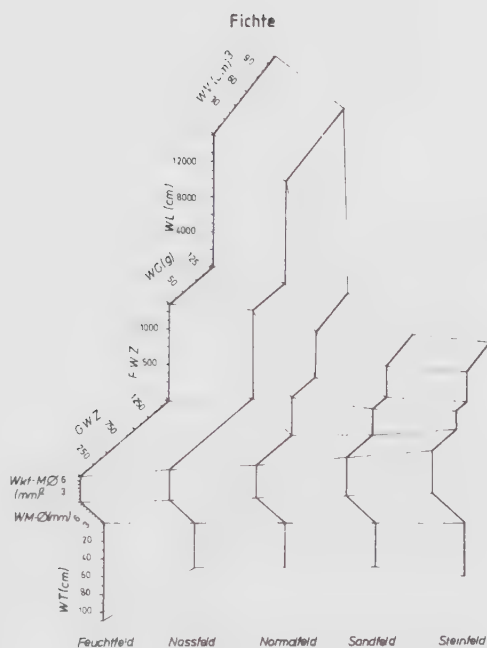


Abb. 59: Synoptischer Vergleich der mittleren wurzelmorphometrischen Daten der Fichtenwurzel in den Mischparzellen auf allen fünf Prüffeldern (Erläuterung im Text)

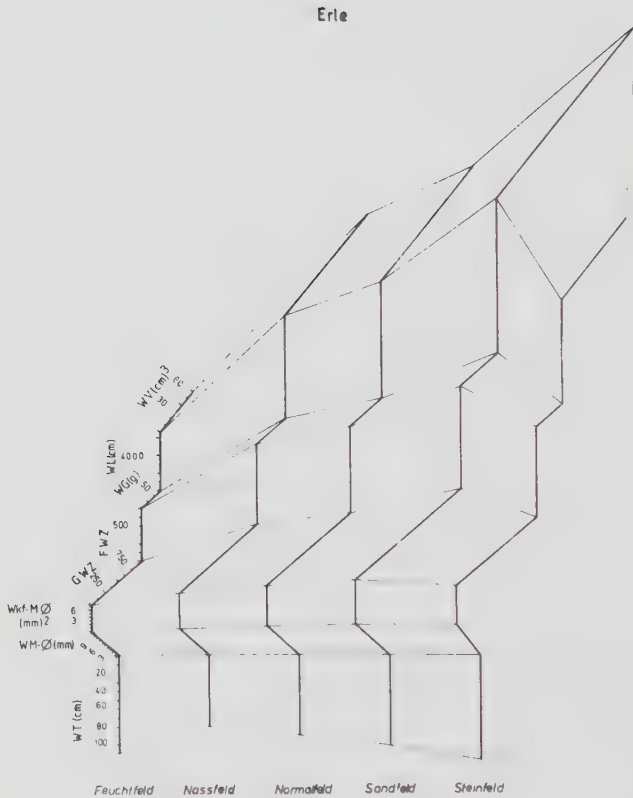


Abb. 60: Synoptischer Vergleich der mittleren wurzelmorphometrischen Daten der Erlenwurzeln in den Mischparzellen auf allen fünf Prüffeldern (Die Koordinatenmaßstäbe sind die gleichen, wie die der Abb. 59)

das einer Maximum - Minimum - Maximum - Bewegung folgte, und dieses Kriterium war die Wurzeltiefe: Die höchsten Tiefen wurden auf dem Feuchtfeld gebildet und die geringsten auf dem Naßfeld, Normalfeld und Sandfeld, und erst auf dem Steinfeld erschloß die Fichtenwurzel eine größere Bodentiefe, aber nicht so tiefgehend wie dies auf dem Feuchtfeld der Fall war: Auf dem Feuchtfeld erlangte die Fichtenwurzel eine Tiefe von 110 cm und auf dem Steinfeld eine solche von 60 cm.

Bei der Erlenwurzel folgten nachstehende Kriterien einer Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung, wobei das Minimum auch auf dem Feuchtfeld, das Maximum auf dem Sandfeld und das zweite Minimum auf dem Steinfeld vorzufinden war: Wurzelvolumen, Wurzellänge, Wurzelgewicht, Feinwurzelzahl, Gesamtwurzelzahl, die mittlere Wurzelkreisfläche und der mittlere Wurzeldurchmesser.

Auch bei der Erlenwurzel folgte die Bodentiefenerschließung einer Maximum - Minimum - Maximum - Bewegung, wobei auch hier das Maximum auf dem Feuchtfeld, das Minimum auf dem Naßfeld und das zweite Maximum auf dem Steinfeld anzutreffen war. Wenn wir die Tiefenerschließung der Erlenwurzel (Abb. 60) unterhalb der Abszisse des Stufenkoordinatensystems mit der Tiefenerschließung der Fichtenwurzel (Abb. 59) ebenfalls unterhalb der Abszissenachse des Stufenkoordinatensystems vergleichend betrachten, so erkennen wir zunächst, daß die Fichte und Erle auf dem am wenigsten ökologisch belasteten Feuchtfeld gleich tief den Boden erschlossen, daß aber mit zunehmender ökologischer Belastung in der Reihenfolge der Prüffelder Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld die Tiefenerschließung der Erlenwurzel stets weiter in die Bodentiefe reichte als die der Fichtenwurzel. Mit anderen Worten: Mit zunehmender ökologischer Belastung unterfährt die Erlenwurzel die Fichtenwurzel und da mit zunehmender Tiefe und ökologischer Belastung die Erlen-

wurzel auch eine zunehmende Mykorrhizenentwicklung ausbildete (siehe Abb. 47) ist es der Erlenwurzel möglich, in entscheidender Weise gerade im Bereich stärkster ökologischer Belastung die Fichte mit Stickstoff zu versorgen und damit zu ihrer Vitalisierung beizutragen.

IV. Besprechung der Ergebnisse

In methodischer Hinsicht sahen wir eingangs, daß die Wurzelmorphometrie im Laufe der Zeit eine Entwicklung vollzog, beginnend mit der Methode GROßKOPF (1950), der als erster versuchte, die Feinwurzelintensitäten eines Wurzelsystems auszumessen, sich dann fortsetzend mit der Methode BARNER (1965), die insbesondere von ZETTEL (1971) erprobt worden ist, wobei die Ausmessungen an einer vertikal gestellten Plexiglasplatte durchgeführt worden sind.

Das von uns weiter entwickelte morphometrische Vorgehen besteht im Grunde genommen aus einer Kombination zwischen der Methode GROßKOPF (1950) und BARNER (1965), wobei allerdings zu sagen ist, daß die neu entwickelte Kastenmethode durchaus eigene methodische Züge trägt, die eine Reihe von weiteren Wurzelkriterien zu untersuchen erlaubt, die nicht mit der Methode GROßKOPF (1950) und auch nicht mit der Methode BARNER (1965) gefunden werden können. Diese Kriterien sind folgende: Die Bestimmung des gesamten Mykorrhizengewichtes, des Wurzel-durchdringungsgrades, des Wurzelvolumens, der Wurzellänge und des Wurzelgewichtes.

Gewiss ist der Arbeitsaufwand bei der Kastenmethode am größten. Bei der Methode GROßKOPF (1950) ist er geringer, weil auch nur weniger Kriterien mit ihr erarbeitet werden können und am geringsten bei der Methode BARNER (1965), die lediglich die Wurzelverhältnisse der Wurzel bzw. Bodenprofilfläche festhält.

Es muß jedoch in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, daß im Grunde das zu untersuchende Objekt bestimmt, welche

Methode am besten angewandt wird. Bei der Methode GROBKOPF (1950) kann nur die sogenannte Zwischenfläche zwischen zwei Bäumen untersucht werden. Bei der Methode BARNER (1965) kann nicht nur die Zwischenfläche zwischen zwei Bäumen untersucht werden, so wie dies ZETTEL (1971) in seiner Dissertation unternommen hatte, sondern es kann auch mit der Methode BARNER das Wurzelsystem einer jungen Pflanze unmittelbar in der Nähe ihres Wurzelhalses untersucht werden, so wie dies in der vorliegenden Arbeit im Kapitel II. 2. A. dargestellt ist.

In der vorliegenden Arbeit ging es in erster Linie darum, die wechselseitigen Wurzelgrößenverhältnisse zwischen Fichtenwurzel und Erlenwurzel in einem Mischbestand zu klären. Dies versuchten wir zunächst mit der Methode GROBKOPF (1950) und BARNER (1965), wobei unsere Vorversuche jedoch keine auswertbaren Einsichten erlaubten: Beim Versuch, die Methode GROBKOPF (1950) anzuwenden, verschoben sich die Lageverhältnisse der Wurzelgrößenordnungen von Fichte und Erle derart, sodaß diese nicht mit einander verglichen werden konnten und bei Anwendung der Methode BARNER (1965) ergab sich eine zu geringe Aussagefähigkeit, weil allein mit der Erfassung der Wurzelverhältnisse an der Profilwand die Datenergiebigkeit zu gering war, als daß ein aussagefähiger Vergleich zwischen der Erlen- und Fichtenwurzel hätte erzielt werden können.

Diese gescheiterten Vorversuche veranlaßten uns, die Kastenmethode zu entwickeln, die im Kapitel II. 2. B. in allen Einzelheiten beschrieben worden ist.-

Im Hinblick auf die Zahl der Arbeitsgänge bei Anwendung aller drei Methoden ist ihre Arbeitsaufwendigkeit und Auswertungsmöglichkeit unterschiedlich zu beurteilen:

Bei der Methode GROßKOPF (1950) haben wir 6 Arbeitsgänge:

1. Einschlag des Wurzelprofils im Bereich der Wurzelzwischenfläche,
2. Herauspräparierung eines Bodenblocks aus dem Profil,
3. Transport desselben in das Labor,
4. Auseinandernehmen des Blocks, getrennt nach Bodenhorizonten,
5. Auszählung der nach Durchmesser klassifizierten Wurzellängen der Feinwurzeln,
6. Berechnung der Feinwurzelintensitäten.

Die Methode GROßKOPF (1950) erlaubt somit nur die Auswertung eines einzigen Wurzelkriteriums, nämlich das der Feinwurzelintensitäten.

Bei der Methode BARNER (1965) haben wir nur 4 Arbeitsgänge:

1. Einschlag des Wurzelprofils entweder im Bereich der Wurzelzwischenfläche oder unmittelbar am Wurzelhals, sofern die Pflanze noch jung ist und keinen ausgeprägten Wurzelanlauf gebildet hat, mit gleichzeitiger Auflage einer Plexiglasplatte,
2. Durchzeichnung der angeschnittenen Wurzeln auf der Plexiglasplatte im Hinblick auf ihre Lagebeziehung und Festlegung der Wurzeldurchmesser,
3. Naturgetreue Übertragung dieser Aufzeichnung auf Transparentpapier,
4. Berechnung der damit gewinnbaren Wurzeldaten:
 - Wurzelschwerpunkt
 - Summenkurve der Wurzeldurchmesser und Wurzeltiefen
 - Wurzeldichte
 - Wurzelabstandssumme
 - Wurzelausnützungsgrad
 - Wurzelkreisfläche
 - Feinwurzelintensität.

Bei der neu entwickelten Kastenmethode haben wir wie bei der Methode GROBKOPF (1950) insgesamt 6 Arbeitsgänge:

1. Herauspräparierung eines Bodenblockes und Umschalung dieses Blockes mit Falzbrettern, sodaß dieser Block an Ort und Stelle untersucht werden kann und nicht in das Labor getragen und dort zerlegt werden muß,
2. Schichtweise Freipräparierung in den verschiedenen Tiefenstufen (wir hatten 10 cm-Tiefenstufen gewählt), wobei die einzelnen Tiefenstufen auch den einzelnen Bodenhorizonten zugeordnet werden können,
3. Auflage einer horizontal gelagerten Plexiglasplatte auf jede gesondert für sich zu untersuchende Tiefenstufe und Übertragung des Wurzelverlaufes auf die Platte mit allen für die Berechnung notwendigen Einzelheiten, so u.a. Markierung der Überkreuzungspunkte der Wurzeln zwecks Berechnung des Wurzeldurchdringungsgrades,
4. Übertragung dieser Aufzeichnungen auf Transparentpapier, wie bei der Methode BARNER (1965)
5. Sobald diese Übertragung erfolgt ist, schichtweise Abschneidung des zeichnerisch festgehaltenen Wurzelmaterials, seine Einfüllung in Zellophanbeutel, getrennt nach Holzarten und Tiefenstufen,
6. Messung bzw. Wiegung, sowie Berechnung von folgenden Wurzel-
daten:
 - Wurzelzahl
 - Wurzeldurchmesser
 - Wurzellänge
 - Wurzeltrockengewicht
 - Wurzelvolumen
 - Wurzelausnützungsgrad
 - Wurzeldichte
 - Mykorrhizengewicht
 - Feinwurzelintensität
 - Wurzeldurchdringungsgrad.

Aus der methodischen und arbeitstechnischen Gegenüberstellung dieser drei Methoden ergibt sich somit folgendes:

Die Methode GROßKOPF (1950) ist arbeitsaufwendig mit 6 Arbeitsgängen und erlaubt zum Schluß lediglich die Berechnung eines einzigen Wurzelkriteriums, nämlich das der Feinwurzelintensität.

Die Methode BARNER (1965) ist weniger arbeitsaufwendig, wie die Methode GROßKOPF, mit 4 Arbeitsgängen und erlaubt die Berechnung von 7 Wurzelkriterien.

Die neu entwickelte Kastenmethode als Kombination zwischen den beiden oben genannten Methoden ist zumindest ebenso arbeitsaufwendig wie die Methode GROßKOPF und verlangt auch 6 Arbeitsgänge, erlaubt aber im Vergleich zu allen anderen wurzelmorphometrischen Bestimmungsmethoden die Auswertung von 10 Wurzelkriterien, wobei allerdings zu sagen ist, daß durch die schichtweise Abtragung des Bodens und der ebenso schichtweisen Herauspräparierung der zahlreichen Tiefenstufen die Kastenmethode sicherlich am arbeitsaufwendigsten ist. Allein auf dem am tiefsten durchwurzelten Steinfeld mußten wir 12 Schichten von 10 cm-Tiefenstufen freipräparieren.

Die einzige Arbeit, die sich mit der Methode GROßKOPF (1950) und der Methode BARNER (1965) kritisch auseinandersetzte, war die Dissertation von ZETTEL (1971).

Seine von ihm ausgearbeiteten Wurzelkriterien konnten auch bei uns gefunden werden, nämlich die Kriterien des Wurzelschwerpunktes, der Summenkurve, der Wurzeldurchmesser, der Wurzel-dichte und der Abstandssumme, sowie des Wurzelausnützungsgrades. Bei ZETTEL (1971) war es außerdem noch möglich, die Feinwurzelintensität zu bestimmen und diese zu vergleichen mit den Feinwurzelintensitäten nach GROßKOPF (1950), wobei er bei Anwen-

dung der Plexiglasplattenmethode ein einfacheres Bestimmungsverfahren wählen konnte, indem er zur Bestimmung der Größe der Feinwurzelintensität nicht, wie bei GROSSKOPF (1950) die Längensummen der Feinwurzeln, sondern lediglich die Zahl der Feinwurzeln in Rechnung stellte. Doch verfügte ZETTEL (1971) bei seinen untersuchten erwachsenen Bäumen über eine ausreichend große Wurzelzahl (im Mittel mehr als 127 Wurzeln je Baum) und entsprechend reichliche Feinwurzelintensitäten. Bei unseren Jungwuchspflanzen konnten mit der Plexiglasplattenmethode entsprechend wesentlich weniger Wurzeln gefunden werden, nämlich im Mittel nur 39,8 Grobwurzeln und 24,8 Feinwurzeln, und zwar bei allen Versuchsanordnungen.

ZETTEL (1971) verfügte also über eine so zahlreiche Wurzelzahl mit dem Umfang eines statistisch auswertbaren Kollektivs, während wir über eine wesentlich geringere Wurzelzahl verfügten, die sich auch statistisch nicht auswerten ließ. Infolgedessen ist es uns nicht gelungen, bei unseren Jungwuchspflanzen die Feinwurzelintensität nach Art von ZETTEL (1971) zu bestimmen, wobei somit betont sein muß, daß hier nicht ein Versagen der Methode vorliegt, sondern ein Ungenügen des Untersuchungsobjekts.

Im Vergleich zur Arbeit ZETTEL (1971) konnten wir die Zahl der erarbeiteten Wurzelkriterien noch um ein weiteres vermehren, nämlich um das der Summenkurven der Wurzeltiefen, die sich in ähnlicher Weise konstruieren lassen wie die Summenkurven der Wurzeldurchmesser, wie dies bereits schon ZETTEL (1971) getan hat. ZETTEL (1971) hat in seiner Arbeit sein Material derartig ausführlich offengelegt und seine Wurzelprofile maßstabgerecht in allen Einzelheiten dargestellt, daß es uns an Hand dieser Unterlage nachträglich noch möglich wäre, ebenso die Summenkurven der Wurzeltiefen seiner von ihm untersuchten Bäume zu konstruieren.

ZETTEL (1971) war bestrebt, mit der Plexiglasplattenmethode eine methodische Brücke zu GROSSKOPF (1950) zu schlagen, indem er die Feinwurzelintensitäten nach BARNER (1965) (lediglich bestimmt durch Auszählung der Feinwurzelzahlen) mit den Feinwurzelintensitäten nach GROSSKOPF (1950) (bestimmt durch die Wurzellängensummen der Feinwurzeln) miteinander verglich. Im Graphikum 19 seiner Dissertation stellte er in einem tiefenstufenbezogenen Koordinatensystem in vergleichender Gegenüberstellung die Feinwurzelintensitäten nach GROSSKOPF (1950) und BARNER (1965) dar und fand für alle seine 4 Untersuchungsstandorte (Braunerde, mäßiger Pseudogley, Pseudogley, starker Pseudogley) nahezu spiegelbildliche Kurven, so daß er damit nachgewiesen hatte, daß ohne weiteres die sehr viel einfachere Bestimmung der Feinwurzelzahlen durch die sehr viel zeitraubendere Bestimmung der Feinwurzellängensumme gegenseitig ersetzt und ergänzt werden könne.

Uns ging es nun auch darum zu tun, einen analogen Vergleich, aber diesmal unter Anwendung der Kastenmethode zu vollziehen. Wir hatten daher im Kapitel III.5. über "Die nach BARNER und GROSSKOPF mit Hilfe der Kastenmethode bestimmten Feinwurzelintensitäten" einen gleichen Vergleich durchgeführt wie dies ZETTEL (1971) tat und bedienten uns der gleichen graphischen Darstellungsweise wie er (siehe hierzu Abb. 54 - 58) und konnten, ebenso wie er, eine gleiche Spiegelbildlichkeit der Kurven erreichen, so daß damit der Nachweis erbracht ist, daß zumindest im Hinblick auf die Bestimmung der Feinwurzelintensität eine methodische Verbindung zwischen der Methode GROSSKOPF (1950), der Methode BARNER (1965) und der neuen Kastenmethode hergestellt werden kann, allerdings unter der Voraussetzung, daß bei Anwendung der Methode BARNER (1965) ein ausreichendes Feinwurzelkollektiv zur Verfügung steht, so wie dies bei der Dissertation ZETTEL (1971) der Fall war.

Stehen jedoch bei Anwendung der Plexiglasplattenmethode z.B. bei der Untersuchung von Jungwuchspflanzen nur zu wenige Feinwurzeln zur Verfügung, dann muß in einem solchen Falle von der Plexiglasplattenmethode nach BARNER unmittelbar zur Anwendung der Kastenmethode übergegangen werden, die naturgemäß sehr viel umfangreicheres Wurzelkollektiv erschließt.

Die Kastenmethode besitzt im Vergleich zur Plexiglasplattenmethode nach BARNER (1965) den methodischen Vorteil, daß sie in jedem Falle alle Wurzeln, auch insbesondere alle vertikal verlaufende Wurzeln zu erfassen vermag, während dies bei der Methode BARNER, wie auch bei allen anderen, das Wurzelsystem nur partiell erfassenden Wurzelbestimmungsmethoden (so u.a. KRAUS und Mitarbeiter (1934, 1935, 1939), GROSSKOPF (1950), EHWALD (1955), KERN, MOLL und BRAUN (1961), MELZER (1962), HEIKURAINEN (1957), KALELA (1950, 1958), FIDELER, HUNGER und ZANT (1963) nicht möglich ist.

Ähnlich, wie schon ZETTEL (1971) bemüht war, den entscheidenden methodischen Vergleich zwischen der Plexiglasplattenmethode nach BARNER (1965) mit der Methode nach GROSSKOPF (1950) im Hinblick auf die einzige von GROSSKOPF (1950) bestimmte Feinwurzelintensitätsgröße zu ziehen, waren wir nun auch bemüht, an ein- und demselben Untersuchungsobjekt die von ZETTEL (1971) erarbeiteten Wurzelbestimmungskriterien der Gesamtwurzelzahl, des Wurzelausnützungsgrades, der Wurzeldurchmesser und der Wurzeltiefe mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode nach BARNER (1965) nun auch mit der weiterentwickelten Kastenmethode zu vergleichen. Die Abb. 51 - 53 zeigen die gefundenen Vergleichsergebnisse. Bei Betrachtung dieser Ergebnisse kann lediglich gesagt werden, daß keine, sondern nur eine annähernde Spiegelbildlichkeit der Kurvenverläufe gefunden werden konnte, wozu nochmals zu betonen ist, daß die mit Hilfe der Kastenmethode gewonnenen Trendverläufe die wissen-

schaftlich aussagefähigeren sind, weil sie - wie schon mehrfach darauf hingewiesen - auf einer vollständigeren Wurzelerfassung beruhen.

Man kann in diesem Zusammenhang lediglich bemerken, daß die sicher immer mehr an Bedeutung zunehmende Wurzelbestimmungsgröße des Wurzelausnützungsgrades (Abb. 52) noch mit die beste annähernde Gleichläufigkeit des Plexiglasplattenmethodentrendverlaufs mit dem Kastenmethodentrendverlauf erbrachte, so daß zumindest gesagt werden kann, daß zur Bestimmung dieses sehr wichtigen Wurzelkriteriums die erste Orientierung durchaus mit Hilfe der Plexiglasplattenmethode geschehen kann. —

Zum Vergleich unserer Wurzeluntersuchungsergebnisse und der Untersuchungsergebnisse früherer Autoren bietet sich als wichtigste Literaturquelle die Dissertation HASSAN (1976) an, deren Untersuchungen auf den gleichen Prüffeldern mit den gleichen Versuchsanordnungen durchgeführt worden sind wie die unsrigen. HASSAN (1976) untersuchte jedoch lediglich mit Hilfe morphometrischer Methoden die oberirdischen Sproßachsen-systeme, während wir uns morphometrisch lediglich mit den Wurzeln der auch von HASSAN (1976) untersuchten Pflanzen beschäftigten.

HASSAN (1976) hatte generell festgestellt, daß mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder bei den Fichten eine Verkleinerung aller ihrer oberirdischen Organe stattgefunden hatte, und zwar im Hinblick auf die Pflanzenhöhen, Astlängen, Stammdurchmesser und Astdurchmesser. Außerdem konstatierte er im Hinblick auf den Vergleich zwischen Fichtenreinbestand und Fichtenmischbestand Fi/El folgendes Resultat: Je mehr eine Fichte eine Vitalisierung durch Beimischung mit Erle erfuhr, desto größer fielen die Pflanzenhöhen, Astlängen, Stammdurchmesser

und Astdurchmesser aus. Je mehr die Vitalität der Fichte herabgesetzt war, einmal durch Fehlen der Beimischung mit Erle, zum anderen durch zusätzliche Pflanzung mit wurzelkonkurrierenden anderen Fichten, desto mehr fielen die Pflanzenhöhen, Astlängen, Stammdurchmesser und Astdurchmesser in ihrer Größenordnung ab. Diese soeben genannten Relationen hatte HASSAN (1976) in seiner Dissertation in einem zusammenfassenden Graphikum auf Seite 79 zur Darstellung gebracht.

Wir hatten ein vollkommen analog konstruiertes Graphikum weiter vorn im Kapitel III.6 in Abb. 59 zur Darstellung gebracht, die im Hinblick auf die Wurzelorgangrößen nur teilweise dem Trend der oberirdischen Organgrößen von HASSAN (1976) folgen. Zwar konnte auch für die Fichtenwurzeln teilweise eine solche Reduzierung der Wurzelorgane mit zunehmender ökologischer Belastung gefunden werden, und zwar für die Größenordnungen des Wurzelvolumens, der Wurzellänge, des Wurzelgewichts sowie auch für die Zahl aller ausgezählten Wurzeln mit Einschluß der Feinwurzeln. All diese Daten verkleinerten sich mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder in der Reihenfolge des Feuchtfeldes, des Naßfeldes, des Normalfeldes, des Sandfeldes und des Steinfeldes.

Doch drei weitere Wurzelkriterien folgen nicht dem soeben genannten Trend: Die Wurzeltiefe folgt nämlich dem Trend einer Maximum - Minimum - Maximum - Bewegung, wonach die Fichten auf dem Feuchtfeld die höchsten, auf dem staunassen Naßfeld die geringsten Wurzeltiefen bildeten, wobei jene über die Reihenfolge Normalfeld, Sandfeld im Hinblick auf die Wurzeltiefenbildung zunahmen, so daß die Wurzeln der Fichte auf dem Steinfeld deutlich tiefer in den Boden eindrangten als auf dem Naßfeld.

Ebenso konstatierten wir einen anderen Trend bei der Bildung

der Wurzeldurchmesser und der Wurzelkreisfläche: Mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder in der Reihenfolge Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld nahmen sowohl die Wurzeldurchmesser als auch die Wurzelkreisfläche linear zu.

Während also bei den oberirdischen Organen in morphometrischer Hinsicht bei HASSAN (1976) mit zunehmender ökologischer Belastung lediglich ein einziger Trend beobachtet werden konnte, nämlich der einer Maximum - Minimum - Bewegung, konnten wir bei der morphometrischen Erfassung der Wurzeln drei verschiedene Trends beobachten: Eine Maximum - Minimum - Bewegung wie bei HASSAN (1976) bei 5 Wurzelkriterien, eine Minimum - Maximum - Bewegung für zwei Wurzelkriterien und eine Maximum - Minimum - Maximum - Bewegung für ein Wurzelkriterium. Somit kann ganz allgemein gesagt werden, daß im Gegensatz zum oberirdischen Sproßachsensystem sich ein wesentlich komplizierterer morphologischer Aufbau der Wurzel im Vergleich zum Aufbau des oberirdischen Sproßachsensystems vollzieht.

Wenn wir nunmehr im Vergleich zur Fichte die Wurzelmorphometrie der Erle betrachten (siehe hierzu Abb. 60), so ergibt sich geradezu ein entgegengesetztes Bild, bzw. ein Antagonismus zur Fichtenwurzelbildung: Bei der Fichte lag der Schwerpunkt der Wurzelorganbildung auf dem ökologisch optimalen Feuchtfeld und Naßfeld. Bei der Erle lag er auf den ökologisch belastetsten Prüffeldern, also auf dem Sand- und Steinfeld. Auf dem extrem trockenen Sandfeld bildete die Erle einen Maximalwert des Wurzelvolumens, der alle anderen Volumenwerte der anderen Prüffelder weit übertraf. Mit ihm fanden auch gleichzeitig die Wurzellängen, Wurzelgewichte, die Gesamtzahl der Grobwurzeln und der Feinwurzeln, die Wurzelkreisfläche und Wurzeldurchmesser eine maximale Ausbildung. All diese Größen vollzogen im Gegensatz zur Fichte eine eindeutige Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung mit Minimum auf dem Feuchtfeld, mit eindeutigem Maxi-

mum auf dem Sandfeld und wieder mit einem Minimum auf dem Steinfeld.

Jedoch andere untersuchte Wurzelkriterien wichen von diesem Trend leicht ab: Bei der Ausbildung der Wurzeldurchmesser und der Wurzelkreisfläche können wir eine geringfügige Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung feststellen, und bei der Wurzeltiefe ergab sich ein ungefähr gleiches Bild wie bei der Fichte, nämlich eine Maximum - Minimum - Maximum - Bewegung, wobei die jeweiligen Extremwerte auf den gleichen Prüffeldern festzustellen waren wie bei der Fichte.

Mit das aufschlußreichste Ergebnis unserer Arbeit ist der eindeutige Befund, daß sich die Erlenwurzel im Zustand ökologischer Belastung enorm verstärkt. Diese Verstärkung wird auch in der früheren Literatur bei McVEAN (1956) bestätigt, wozu KREUTZER (1961) zusätzlich festgestellt hatte, daß mit dieser Vergrößerung die Ausbildung eines zweistöckigen Erlenwurzelsystems einhergeht, was auch durch unsere Ergebnisse bestätigt werden kann.

Die maximal ausgebildete Wurzel mit zweistöckigem System bildete sich bei uns auf dem Sandfeld aus, bei dem sich die Hauptmykorrhizengewichte bis zu einer Bodentiefe von 30 cm verlagerten (siehe dazu Abb. 47), wozu zu sagen ist, daß sich das Mykorrhizengewicht in der Tiefenstufe von 30 cm gerade auf dem ökologischen Extremfeld, nämlich auf dem Steinfeld, noch eindeutig, und zwar von 3,60 auf 3,95 verstärkt hat.

Wir hatten als repräsentative Größe für die Mykorrhizenbildung lediglich die Mykorrhizengewichte bestimmt und von einer Auszählung der Bakterienknöllchen oder noch verfeinerteren Untersuchungsmethoden abgesehen, weil ja die Arbeit sich lediglich in einem rein wurzelmorphometrischen Rahmen bewegen soll.

Um jedoch dem Leser ein eindrückliches Bild von dieser doch nennenswerten Zunahme des Mykorrhizengewichtes zu vermitteln, soll an dieser Stelle wenigstens größenordnungsmäßig mitgeteilt werden, daß mit der Gewichtszunahme um 0,35 Gramm (also von 3,60 auf 3,95 g) eine mittlere Bakterienknöllchenzunahme um 59,5 Stück verbunden ist. In dieser Tatsache erkennen wir einen Ausdruck für die Vitalisierung der Erle gegenüber ihren benachbarten Fichten und die bereits bei HASSAN (1976) eindeutig festgestellte morphometrische Verstärkung der Fichtenorgane durch zusätzliche Stickstoffbindung, bzw. Stickstoffabgabe seitens der Mykorrhizen an die Fichten.

Ohne auf Einzelheiten der Arbeit HASSAN (1976) einzugehen, soll nur an dieser Stelle erwähnt werden, daß er das Resultat der Stickstoffabgabe der Erlenmykorrhizen an die Fichten dadurch nachgewiesen hatte, daß er feststellte, daß die mit Erlen gemischten Fichten signifikant höhere Stickstoffgehalte enthielten als die Fichten im Reinbestand.

Wenn wir nun diesem Befund den weiter vorn schon festgestellten Befund nicht nur der Mykorrhizengewichte, sondern auch der Wurzeltrockengewichte gegenüberstellen, so erkennen wir den Vitalisierungseffekt noch eindeutiger (siehe hierzu die Darstellung der Abb. 43). Auf dem Sandfeld erkennen wir bei der Fichte in der Tiefenstufe von 30 cm ein Wurzelgewicht von 1,90 Gramm und bei der Erle ein solches von 16,86 Gramm, also eine Gewichtsverstärkung der Erle gegenüber der Fichte um den 8,87-fachen Wert. Auf dem Steinfeld erkennen wir bei der Fichte in der Tiefenstufe von 30 cm ein Wurzelgewicht von 4,51 Gramm und bei der Erle ein solches von 10,32 Gramm, also eine zweifelsohne geringere Trockengewichtsbildung um den 2,20-fachen Wert.

Wenn wir jedoch zusätzlich in dieser Tiefenstufe ein Mykorrhizenvermehrung zwischen Sandfeld und Steinfeld in der Größenord-

nung von 0,35 Gramm konstatieren, was - wie gesagt - einer Mykorrhizenanzahlvermehrung von 59,5 entspricht, so wird uns deutlich vor Augen geführt, daß der Vitalisierungseffekt auf dem Steinfeld am größten ist: Ziehen wir hierzu die Abb. 50 heran mit dem Säulendiagramm in der oberen Ecke, so finden wir auf dem Steinfeld den höchsten Relativwert des Verhältnisses zwischen Sproß- und Wurzelvolumen mit dem Betrag von 28 %, der in keinem der vorausgegangenen ökologisch günstiger gestellten Prüffeldern erreicht worden ist.

Wir hatten somit durch Beiziehung unserer Wurzelkriterien vergleichsweise den ausschließlichen Kriterien der oberirdischen Sproßachsensysteme bei HASSAN (1976) im Hinblick auf den Vitalisierungseffekt der Erle gegenüber der Fichte einen vertieften Einblick gewonnen, wobei der recht beträchtlichwerdende Vitalisierungseffekt der Erle gerade auf extrem ökologisch belastetem Terrain erkannt werden kann, wie aus der Gegenüberstellung der Abb. 59 und 60 zu ersehen ist: Die Fichte bildete auf dem Sandfeld minimal kleine Organe aus, die sich auf dem Steinfeld nicht wesentlich veränderten, mit Ausnahme einer etwas mehr in den Boden gehenden Wurzeltiefe. Die Erle hingegen bildete auf dem Sandfeld maximale Wurzelorgane aus, die aber auf dem noch stärker ökologisch belasteten Steinfeld eine beträchtliche Reduktion erfahren haben. Lediglich ist auch bei der Erle vergleichsweise zum Sandfeld auf dem Steinfeld eine größere Wurzeltiefe festzustellen.

Bei unserer ökologischen Reihe (Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld) finden sich somit die interessantesten Ergebnisse bei den letzteren beiden Feldern Sandfeld und Steinfeld. Der schon mehrfach erwähnte Vitalisierungseffekt der Erle oder auch jeder anderen mykorrhizenbildenden Holzart kommt also am deutlichsten in extrem ökologischen Lagen zum Tragen. Wenn künftig ähnliche wurzelmorpho-

metrische Vergleiche gezogen werden sollen, so interessieren hier also stets die extrem ökologisch belasteten Lagen, was insbesondere im Zusammenhang der Untersuchung von Ödland-aufforstungsfragen auf ökologisch extremen Gebieten interessieren kann.

Hierbei interessiert insbesondere der Umschlagspunkt in der organographischen Ausbildung der mykorrhizenbildenden Hilfs-holzart in doppelter Hinsicht: Einmal jener Punkt mit maximaler Organbildung wie auf unserem Sandfeld und jener Punkt auf einem noch stärker ökologisch belasteten Terrain wie auf unserem Steinfeld, bei dem sich zwar eine Wurzelorganrückbildung, jedoch eine Mykorrhizenvermehrung vollzieht, so daß die begünstigte Hauptholzart (bei uns die Fichte) durch diese Mykorrhizenvermehrung noch mehr gefördert wird auf dem weniger ökologisch belasteten Sandfeld.

Wir versuchten also am Beispiel eines Fi/El-Mischbestandes den Vitalisierungsvorgang an Hand von wurzelmorphometrischen Daten zu belegen. Es liegt jedoch auf der Hand, daß der gleiche Vorgang auch bei jeder anderen mykorrhizenbildenden Hilfs- und Hauptholzart untersucht werden kann. Es wird sich dann erweisen, ob sich hier die gleichen Trendverläufe in einer ökologischen Reihe einordnen lassen, so wie sie aus unserer Prüffeldserien zur Verfügung stand. Daß in dieser Hinsicht ein derartiger Ausbau der wurzelmorphometrischen Forschung Aussicht auf Erfolg verspricht, geht aus den Beobachtungen hervor, wie sie bereits schon in der älteren Literatur mitgeteilt worden sind. Es soll hier nur auf die Hinweise aufmerksam gemacht werden, die bereits GAYER (1886), NEUENHOFER (1952), PFÜGER (1966) und KNAPP (1967) und LEIBUNDGUT (1976) gegeben haben, wobei nur diese beiden letzteren experimentelle Ansätze geliefert haben, aber lediglich in der Form von Wurzelwettbewerbsversuchen in Töpfen, während wir unsere Wurzeluntersuchungen am natürlichen Standort durchgeführt hatten, um die Ein-

sicht in das Vitalisierungsproblem zu vertiefen.

Außerdem läßt sich das von uns erstmals ausgearbeitete Kriterium des Wurzeldurchdringungsgrades methodisch ausbauen: Wir hatten im Kapitel II.2.B.1 den Wurzeldurchdringungsgrad als die Häufigkeit der Überkreuzungspunkte zwischen zwei Holzarten in verschiedenen Tiefenstufen definiert. Dieses Kriterium kann nach unserer Auffassung etwa in die Richtung ausgebaut werden, daß nicht nur die Überkreuzungshäufigkeit, sondern zusätzlich noch die Wurzellängensumme hinter den Überkreuzungspunkten festgestellt werden. Weiterhin kann noch der methodische Ausbau in der Richtung erweitert werden, indem nicht nur die Wurzellängensumme, sondern speziell auch die den Wurzellängen anhaftenden Mykorrhizengewichte gewogen und gesondert ausgewertet werden.

Mit anderen Worten, die vorliegende Arbeit kann aus der Sicht der noch in Aussicht genommenen Objekte eine Erweiterung erfahren, ganz besonders noch auf methodischem Gebiet, um noch wesentlich verfeinerte Einsichten in das Zusammenspiel zwischen Hauptholzart und Hilfsholzart zu gewinnen.

V. Zusammenfassung der Ergebnisse

1. Methoden

- A. Auf der Freifeldprüfanlage der Forschungsstelle für Experimentelle Landschaftsökologie der Universität Freiburg wurden Fichtenreinanbauten und Mischanbauten mit Erle auf der dort befindlichen Prüffeldserie Feuchtfeld, Naßfeld, Normalfeld, Sandfeld und Steinfeld angelegt, wobei, beginnend mit dem ökologisch optimal gestellten Feuchtfeld, sich fortsetzend über das Naßfeld und Normalfeld (letzteres Feld mit mittleren ökologischen Bedingungen) und endigend mit den am stärksten ökologisch belasteten Prüffeldern Sand- und Steinfeld eine zunehmende ökologische Belastung für das Gedeihen der angebauten Pflanzen experimentell hergestellt werden konnte.
- B. Nachdem HASSAN im Jahre 1976 auf dieser Prüffeldserie ausschließlich die oberirdischen Sproßachsensysteme dieser Anbauten morphometrisch untersucht hatte, befaßte sich die vorliegende Arbeit ausschließlich mit der morphometrischen Untersuchung ihrer Wurzelsysteme, zunächst mit der Plexiglasplattenmethode nach BARNER (1965) und ZETTEL (1971), bei der die aus einem Bodenprofil heraustretenden Wurzeln in ihren Dimensionen und gegenseitigen Lagebeziehungen festgehalten werden können, was zur Auswertung der Wurzelschwerpunkte, der Summenkurven der Wurzeldurchmesser und der Wurzeltiefen, Wurzeldichten, Wurzelabstandssummen,

Wurzelkreisflächen, Wurzelausnützungsgrade sowie der Auswertung des prozentualen Anteils der Feinwurzeln vergleichsweise zum Anteil aller anderen größer dimensionierten Wurzeln führte.

- C. Die für uns wichtige Größe der an den Erlenwurzeln anhaftenden ektotrophen Mykorrhizengewichte sowie die Lagebeziehungen der in den Mischparzellen entwickelten Fichten- und Erlenwurzeln konnten jedoch mit der Plexiglasplattenmethode nach BARNER (1965) und ZETTEL (1971) nicht bestimmt werden. Infolgedessen mußten wir diese Methode erweitern, indem wir den die Mischparzellen umfassenden Bodenblock mit Falzbrettern umschalt hatten, sodaß hierdurch ein Boden- und Wurzelkasten entstand, sodaß wir diese erweiterte Methode als "Kastenmethode" bezeichneten. Die parallel zur Bodenoberfläche angebrachten Falzbretter dieses Kastens wurden in ihrer Breite gemäß den von uns festgelegten Bodentiefenstufen dimensioniert, wobei hierdurch die Möglichkeit gegeben war, durch die von oben nach unten stufenweise vorgenommenen Falzbrettentnahmen in jeder einzelnen Tiefenstufe alle Mischparzellenwurzeln freizupräparieren und durch jeweilige Auflage einer Plexiglasplatte und Aufzeichnung alle wurzelmorphometrischen Einzelheiten: Die lagebezogenen Wurzelzahlen, Wurzeldurchmesser, Wurzellängen, Wurzelvolumina, Wurzelrockengewichte, Wurzeltiefen, Wurzel-dichten, Mykorrhizengewichte, Wurzel-ausnützungsgrade und Wurzeldurchdringungsgrade festzuhalten.

- D. Da die Plexiglasplattenmethode nach BARNER (1965) und nach ZETTEL (1971) und die erweiterte Kastenmethode gleichermaßen die Bestimmung der Wurzelzahlen, Wurzeldurchmesser, Wurzeltiefen und der Wurzelausnutzungsgrade zu untersuchen erlaubt, wurden die soeben genannten Größen mit beiden Methoden vergleichend untersucht, wobei u. a. eine weitgehende Übereinstimmung des wichtigen Wurzelkriteriums des Wurzelausnutzungsgrades gefunden werden konnte.
- E. Dadurch, daß die Feinwurzelintensitäten nach der Methode BARNER (1965) und ZETTEL (1971) (definiert als die Anzahl der Feinwurzeln je Flächen-, bzw. Volumeneinheit) und die Feinwurzelintensitäten nach GROSSKOPF (1950) (definiert als die Längensumme der Feinwurzeln je Volumeneinheit) gleichermaßen mit der Plexiglasplattenmethode nach BARNER (1965) und ZETTEL (1971) und der neu entwickelten Kastenmethode bestimmt werden konnten, unternahmen wir eine vergleichende Bestimmung mit beiden Methoden und erhielten in den einzelnen Tiefenstufen nahezu identisch verlaufende Feinwurzelintensitätskurven.

2. Ergebnisse

- A. HASSAN fand 1976, daß mit zunehmender ökologischer Belastung der Prüffelder eine allmähliche Reduktion aller oberirdischen Fichtenorgane im Hinblick auf die Sproßhöhen, Astlängen, Astdurchmesser und Stammdurchmesser einer Maximum - Minimum - Bewegung folgten.

Einen solchen Trend konnten wir auch für eine Reihe von wurzelmorphometrischen Daten der Fichtenwurzel konstatieren, und zwar für die Wurzelzahlen, Wurzellängen, Wurzeltrockengewichte, Wurzelvolumina und die Feinwurzelintensitäten.

- B. Von dieser Maximum - Minimum - Bewegung abweichend folgten jedoch andere wurzelmorphometrische Daten einem anderen Trend, nämlich einer Minimum - Maximum - Bewegung: Diese Daten sind die Wurzeldurchmesser, die Wurzelkreisflächen und die Wurzelausnützungsgrade.
- C. Von dieser Minimum - Maximum - Bewegung abweichend folgte jedoch ein anderes wurzelmorphometrisches Datum einem anderen Trend, nämlich einer Maximum - Minimum - Maximum - Bewegung. Dieses Datum ist die Wurzeltiefe mit einem ersten Maximum auf dem Feuchtfeld, mit einem gleich tiefen Minimum auf dem Naßfeld, Normalfeld und Sandfeld und mit einem zweiten Maximum auf dem Steinfeld.
- D. Dasjenige wurzelmorphometrische Datum, das gleichermaßen für die Fichten- und Erlenwurzeln verbindlich ist und ihr gemeinsames Zusammenspiel zum Ausdruck bringt, ist der Wurzeldurchdringungsgrad, der die Anzahl der Überkreuzungspunkte ihrer Wurzelsysteme in den einzelnen Tiefenstufen angibt. Dieses Datum folgt wiederum einer Minimum - Maximum - Minimum - Bewegung: Mit dem ersten Minimum auf dem Feuchtfeld mit 161 Überkreuzungspunkten, mit einem Maximum auf dem Naßfeld mit 521 Überkreuzungspunkten und einem zweiten Minimum auf dem Steinfeld mit 120 Überkreuzungspunkten.

- E. Gänzlich anders als die wurzelmorphometrischen Verhältnisse der Fichtenwurzelsysteme waren die der Erlenwurzelsysteme: Während die Fichtenwurzeln auf dem ökologisch optimalen Feucht- und Naßfeld am stärksten und auf den ökologischen Belastungsfeldern Sand- und Steinfeld am geringsten ausgebildet waren, lagen die Größenverhältnisse bei den Erlenwurzeln umgekehrt: Auf dem ökologisch belasteten Sandfeld bildete sich ein ausgeprägt zweistöckiges Wurzelsystem aus, verbunden mit einem minimalen Wurzelausnützungsgrad, jedoch weiterhin verbunden mit einer Reihe von anderen maximalen wurzelmorphometrischen Werten, welche da sind: Wurzelzahl, Wurzeldichte, Wurzeldurchmesser, Wurzellänge, Wurzelvolumen, Wurzelkreisfläche, Wurzeltrockengewicht und Mykorrhizengewicht.
- F. Auf diese Weise wird der bereits von HASSAN im Jahre 1976 konstatierte Vitalisierungseffekt der Fichte durch die Stickstofflieferung der Erlenwurzelmykorrhizen erklärbar, der sich einmal in einer Erhöhung der Fichtenstickstoffgehalte und zum anderen in einer Verstärkung der oberirdischen Fichtenorgane manifestierte, eine Verstärkung, die überdies auch durch unsere vergleichenden Untersuchungen der unter- und oberirdischen Sproßvolumina bestätigt werden konnte.

VI. Angeführte und benützte Literatur

- AKSOY, H.: Untersuchungen zur Bewertung von Jungpflanzen verschiedener Nadelbaumarten, Dissertation der Staatswissenschaftlichen Fakultät der Universität München, 1965
- AL-SARAF, S.: Hydrologische Untersuchungen in waldbaulich unterschiedlich behandelten Japanischen Lärchenbeständen, Dissertation der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg, 1973
- ANONYMUS: Root Forms in Habitats with Heavy Shrub Competition, Research-Notes of the Departement of Fisheries and the Envirment, Band 33, Heft 4, Seite 26-30, 1977
- BARNER, J.: Das Wurzelsystem der Pflanze als Kriterium für die physiologische Flachgründigkeit des Standorte, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Band 125, Seite 245-247, 1954
- BARNER, J.: Eine Freifeldprüfanlage als waldbauliches Laboratorium mit einstellbaren Wasserhaushaltsbedingungen zur Klärung experimentell ökologischer Fragen, Habilitationsschrift der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg, 1956

- BARNER, J.: Die Wechselwirkungen von Wald und Wasser im Lichte amerikanischer Forschungen, Mitteilungen des Arbeitskreises "Wald und Wasser", Band 4, Koblenz, 1961
- BARNER, J.: Experimentelle ^{Ökologie} ~~Kologie~~ des Kulturpflanzenanbaus, Verlag Paul Parey, Hamburg, 1965
- BARNER, J.: Der Wald, Begründung, Aufbau und Erhaltung, Verlag Friedrich Vieweg, Braunschweig 1967
- BARNER, J. und MIKLAVZIC, J.: Grundlagenforschung für den Aufbau von Holzplantagen in Slowenien, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Band 139, Seite 146-148, 1968
- BERGEMANN, J.: Die Mykorrhizenausbildung einiger Koniferenarten in verschiedenen Böden, Zeitschrift für Weltforstwirtschaft, Band 18, Heft 5/6, Seite 184-202, 1955
- BERGEMANN, J.: Das Mykorrhizaprobem in der Forstwirtschaft, Allgemeine Forstzeitschrift, Band 11, Heft 23/24, Seite 297-304, 1956
- BIBELRIETHER, H.: Wurzeluntersuchungen an Tannen und Eichen in Mittelschwaben, Forstwissenschaftliches Centralblatt, Band 81, Heft 3/4, Seite 230-248, 1962

- BIBELRIETHER, H.: Zur Frage der Wurzelentwicklung von Kiefern auf Sand und auf Pseudogley, Forstwissenschaftliches Centralblatt, Band 82, 4/5, Seite 139-146, 1963
- BIBELRIETHER, H.: Die Bewurzelung von Schwarzerlen in den Auewäldern von Prekmurje (Slowenien), Allgemeine Forstzeitschrift, Band 19, Heft 6, Seite 638-640, 1964
- BIBELRIETHER, H.: Unterschiedliche Wurzelbildung bei Kiefern verschiedener Provenienz, Forstwissenschaftliches Centralblatt, Band 83, Heft 7, Seite 129-139, 1964
- BIBELRIETHER, H.: Die Bewurzelung einiger Baumarten in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften, Allgemeine Forstzeitschrift, Band 21, Heft 47, Seite 808-815, 1966
- BILAN, M. V.: Acrylic resin tubes for studying root growth in tree seedlings, Forest Science, Band 10, Heft 4, Seite 461-462, 1964
- BLACK, C.A.: Soil-Plant relationships, McGraw Hill, New York, 1964
- BONNEMANN, A.: Der gleichaltrige Mischbestand von Kiefer und Buche, Mitteilungen aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft, Band 10, Heft 2, Seite 439-483, 1939

- BÖRNER, H.: Über die Bedeutung gegenseitiger Beeinflussung von Pflanzen in land- und forstwirtschaftlichen Kulturen, Angewandte Botanik, Band 34, Heft 5, Seite 192-211, 1960
- BOSEMARK, N.D.: The influence of nitrogen on root development, Physiologia plantarum, Band 3, Heft 2, Seite 497-502, 1954
- BRUECKNER, E. und JAHN, R.: Über Wurzel Ausbildung verschiedener Holzarten des ostthüringischen Buntsandsteingebietes, Tharandter Forstliches Jahrbuch, Band 83, Heft 11, Seite 150-170, 1932
- BURCKHARDT, H.: Säen und Pflanzen, Verlag Carl Rümpler, 1870
- BÜSGEN, M.: Einiges über Gestalt und Wachstumsweise der Baumwurzeln, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Band 71, Heft 7, Seite 273-278, 1901
- BÜSGEN, M.: Studien über die Wurzelsysteme einiger dicotyler Holzpflanzen, Flora, Band 95, Heft 4, Seite 58-94, 1905
- BÜSGEN, M.: Bau und Leben der Waldbäume, Verlag Gustav Fischer, Jena, 1917

- BÜNSOW, R.: N_2 -Bindung in Wurzelknöllchen von
Alnus, Myrica und Hippophae,
Naturwissenschaftliche Rundschau,
Band 9, Heft 5, Seite 237, 1956
- COTTA, H.: Anweisung zum Waldbau,
Steinkopf, Dresden und Leipzig, 1835
- DENGLER, A.: Waldbau,
Band I und II, Paul Parey Verlag,
Hamburg und Berlin, 1971, 1972
- DIETRICH, H.: Untersuchungen zum Nährstoffkreis-
lauf von Fichtenbeständen im Ost-
gebirge,
Archiv für Forstwesen, Band 12,
Seite 1116-1135, 1963
- DUNNING, D.: Root of Forest Trees,
a Selected list of References,
USA-Department of Agriculture, Cali-
fornia For. Exp. Sta. Nr. 52, 1949
- EHWALD, E.: Der unterirdische Wald. Die Wurzel-
entwicklung unserer Waldbäume in Ab-
hängigkeit vom Standort,
Urania, 1948
- EHWALD, E.: Ergebnisse einer Standortskartierung
im südthüringischen Keupergebiet,
Forstwissenschaftliches Centralblatt,
Band 69, Seite 299-348, 1950

- EHWALD, E.,
HAUSDÖRFER, H.,
KUNDLER und
VETTERLEIN, E.: Standortskundliche Untersuchungen an
diluvialen Sandböden in der Lehrober-
försterei Finowtal,
Archiv für Forstwesen, Band 4, Heft 5/6,
Seite 481-500, 1955
- EHWALD, E.: Zum Begriff und Wesen der Bodenfrucht-
barkeit,
Sitzungsbericht der Deutschen Akademie
der Landwirtschaftswissenschaften zu
Berlin, Band 12, 1963
- EHWALD, E.,
BUCHHOLZ, E.,
NEUMANN und
VETTERLEIN, E.: Neue Ergebnisse über Durchwurzelung
und Wasserhaushalt in Sandböden und
lehmbeeinflussten Sandböden und ihre
Bedeutung für den Waldbau,
Die sozialistische Forstwirtschaft,
Band 13, Heft 3/4, Seite 72-74 und
113-116, 1963
- EIDMANN, F.: Untersuchungen über die Wurzelatmung
und Transpiration unserer Hauptholz-
arten,
Schriftenreihe der Hermann Göring
Akademie der Deutschen Forstwissen-
schaft, Band 5, 1943
- EIDMANN, F.: Atmung der unterirdischen Organe und
Abgaben an die Mykorrhiza,
Internationales Symposium der Baum-
physiologen, Innsbruck, 1963

- ENGLER, A.: Untersuchungen über das Wurzelwachstum der Holzarten,
Mitteilungen der Schweizerischen Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen, Band 7, S. 247 - 317, 1903
- ETTLINGER, P.: Wurzelbeobachtungen an einem jungen Steppenstrauch,
Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, Band 122, Heft 4, S. 181 - 184, 1971
- FABRY, R.: Bodenkunde,
Carl Hanser - Verlag, München, 1950
- FAYLE, D. C. F.: Rooting Habit of Sugar maple and yellow Birch,
Department of Forestry Publication, No. 1120, 1965
- FEHRENBACHER, J. B. und
ALEXANDER, J. D.: A method for Studying Corn Root distribution using a Soil,
Agron. J., Band 4, Heft 3, S. 469 - 472, 1955
- FEHRENBACHER, J. B.,
JOHNSON, P. R.,
OPELL, R. T. und
JOHNSON, P. E.: Root penetration and development of some Farm crops as related to Soil physical and chemical properties,
7th. International Congress Soil Science Madison, Wisc. USA, Band III, S. 243, 1960

FIEDLER, H.,
HUNGER, W. und
ZANT, R.:

Untersuchungen über die Bodendurchwurzelung der Fichte,
Archiv für Forstwesen, Band 12, Heft 11,
S. 1214 - 1223, 1963

FRASER, A. I.:

The Soil and Root as Factors in Tree Stability,
Forestry, Band 23, Heft 1, S. 117 - 127,
1962

FRÖHLICH, H. J. und
DIETZE, W.:

Untersuchungen über Wurzelentwicklung an
Pflanzen der Gattung Populussektionen
Aigeiros, Leuce und Tacamahaca,
Silvae Genetica, Band 19, Heft 1,
S. 131 - 144, 1970

GAYER, K.:

Der Waldbau,
Hempel und Parey - Verlag, Berlin, 1880

GAYER, K.:

Der gemischte Wald
Paul Parey - Verlag, Berlin, 1886

GLATZEL, K.:

Die Fichte als Tiefwurzeler,
Allgemeine Forstzeitschrift, Band 10,
Heft 35/36, S. 414 - 413, 1955

GLATZEL, K.:

Wurzelausbildung der wichtigsten Wirtschaftsholzarten auf sandig-tonigen Keuperböden,
Allgemeine Forstzeitschrift, Band 16,
Heft 8/9, S. 140 - 144, 167 - 170, 1961

- GLATZEL, K.: Boden- und Wurzelphotographie,
Allgemeine Forstzeitschrift, Band 19,
Heft 29/30, S. 437 - 439, 1964
- GÖBL, F.: Mykorrhizauntersuchungen in einem sub-
alpinen Fichtenwald,
Mitteilungen der Forstlichen Bundes-
Versuchsanstalt Mariabrunn, Heft 66,
S. 173 - 195, 1965
- GÖTTSCHE, D.: Verteilung von Feinwurzeln und Mykorrhizen
im Bodenprofil eines Buchen- und Fichten-
bestandes im Solling,
Mitteilung der Bundesforschungsanstalt
für Forst- und Holzwirtschaft, Reinbek,
Nr. 88, 1972
- GROSSKOPF, W.: Bestimmung der charakteristischen Fein-
wurzelsintensitäten in ungünstigen Wald-
bodenprofilen und ihre ökologische Aus-
wertung,
Mitteilung der Bundesanstalt für Forst-
und Holzwirtschaft, Reinbek, Nr. 11,
S. 1 - 19, 1950
- GROTH, O.: Die Wurzelbildung der Douglasie und ihr
Einfluß auf die Sturm- und Schneefestig-
keit dieser Holzart,
Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Band 103,
Heft 13/16/19, S. 186 - 205, 217 - 231,
268 - 285, 1927
- GRÜMMER, G.: Die gegenseitige Beeinflussung höherer
Pflanzen, "Allelopathie",
VEB Gustav Fischer - Verlag, Jena, 1955

- HARTIG, R.: Lehrbuch der Anatomie und Physiologie der Pflanzen unter besonderer Berücksichtigung der Forstgewächse, Verlag Paul Parey, Berlin, 1891
- HASSAN, S.: Untersuchungen über Organunterschiede von Fichtenpflanzen im Reinbestand und im Mischbestand mit Erle, Dissertation der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg, 1976
- HAUSDÖRFER, H. B.: Die Durchwurzelung unter Kiefer auf zwei Standorten des Choriner Sandes, Archiv für Forstwesen, Band 6, Heft 11/12, S. 811 - 827, 1957
- HEINRICH, F.: Besprechung zu Großkopf, W., 1950: Bestimmung der charakteristischen Feinwurzelintensitäten in ungünstigen Waldbodenprofilen und ihre ökologische Auswertung, Forstarchiv, Band 23, Heft 1, S. 21 - 22, 1952
- HEIKURAINEN, L.: Über Veränderungen in den Wurzelverhältnissen der Kieferbestände auf Moorböden im Laufe des Jahres, Acta Forestalia Fennica, Band 65, Heft 2, S. 1 - 54, 1957
- HEIKURAINEN, L.: Der Wurzelaufbau der Kiefernbestände auf Reisermböden und seine Beeinflussung durch die Entwässerung, Acta Forestalia Fennica, Band 65, Heft 3, S. 78 - 85, 1957

- HEIKURAINEN, L.: Der Wurzelaufbau in Mischwäldern auf entwässerten Moorböden,
Acta Forestalia Fennica, Band 67, Heft 2,
S. 24 - 32, 1958
- HEIKURAINEN, L.: Über den Aufbau des Wurzelwerks von Beständen auf entwässerten Mooren,
Bericht vom 13. IUFRO-Kongreß, Wien,
2. Teil, Band 1, Referat Nr. 3, S. 23 f.,
1961
- HENGST, E.: Wurzelstockuntersuchungen an der Douglasie,
Archiv für Forstwesen, Band 7, Heft 4/5,
S. 338 - 351, 1958
- HERTZ, M.: Die erste Entwicklung des Wurzelwerkes der Fichte,
Acta Forestalia Fennica, Band 41, Heft 3,
S. 1 - 48, 1935
- HILF, H. H.: Wurzelstudien an Waldbäumen,
M. und H. Schaper - Verlag, Hannover, 1927
- HILF, H. H.: Studien über die Wurzelausbreitung von Fichte, Buche und Kiefer,
Dissertation der Forstlichen Hochschule Eberswalde, 1927
- HOCHTANNER, G. und SEITSCHKE, O.: Wuchsleistung von Kiefernbeständen auf Meliorierungsflächen nach dem Bodenwöhler Verfahren,
Forstwissenschaftliches Centralblatt,
Band 83, Heft 1, S. 1 - 22, 1964

- HOFFMANN, F.: Die Bedeutung steigender W- und P-Gaben sowie unterschiedlicher Bodenart für Wachstum und Ernährung von Fichtensämlingen, Albrecht Thaer - Archiv, Band 52, Heft 5, S. 676 - 698, 1964
- HOFFMANN, G.: Einfluß von Dürre auf das Wurzelwachstum (Ökologie und Physiologie des Wurzelwachstums), Internationales Symposium der Baumwurzelforschung, Potsdam, 1971
- HOERNSTEIN, H. P.: Untersuchungen über den Stammabfluß von Koniferen und seine Abhängigkeit von deren morphometrischer Ausgestaltung, Dissertation der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg, 1977
- HOLMSGAARD, E. und SCHARFF, H.: Living stumps in Norway Spruce Stands (dänisch), Det Forstlige Forsøgswaesen i Danmark, Band 28, Heft 2, S. 97 - 151, 1963
- HOLSTENER-JØRGENSEN, H.: Investigations of Root systems of Oak, Beech and Norway Spruce on Groundwater affected moraine Soils with a Contribution to elucidation of evapotranspiration of Stands, Det Forstlige Forsøgswaesen i Danmark, Band 25, Heft 1, S. 225 - 299, 1958

HOUGH, W. A.,
WOODS, F. W. N. und
McCORMACK, M. L.:

Roots Extension of Individual Trees in
Surface Soils of a Natural Longleaf Pine-
Turkey Oak Stand,
Forest Science, Band 11, Heft 2, S. 223 -
242, 1965

JOACHIM, H. F.:

Untersuchungen über die Wurzelbildung der
Pappel - und die Standortsansprüche von
Pappelsorten,
Wissenschaftliche Abhandlungen der Deut-
schen Akademie der Landwirtschaftswissen-
schaften zu Berlin, Band 7, 1953

KALELA, E. K.:

Untersuchungen über die Entwicklung der
Fichten - Weißerlen - Mischbestände in
Ostfinnland,
Acta Forestalia Fennica, Band 44, Heft 2,
S. 1 - 198, 1936

KALELA, E. K.:

The horizontal Roots of Pine and Spruce
Stands,
Acta Forestalia Fennica, Band 57, Heft 2,
S. 1 - 79, 1950

KELLEY, O. S.,
HARDMAN, S. A. und
JENNINGS, D. S.:

A Soil sampling machine for obtaining two
three-and four-inch diameter cores of un-
disturbed soil to a depth of six feet,
Soil Science Society of American Procee-
dings, 1947

KERN, K. G.,
MOLL, W. und
BRAUN, H. J.:

Wurzeluntersuchungen in Rein- und Mischbeständen des Hochschwarzwaldes,
Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Band 132
Heft 10, S. 241 - 259, 1961

KLOB, F.:

Experimentelle Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung von Kulturpflanzen und Unkräutern,
Hohenheimer Zeitschrift für Ackerbau und Pflanzenbau, Band 115, S. 375 - 406, 1962

KNAPP, R.:

Über die Möglichkeiten der Durchsetzung und Ausbreitung von Pflanzenindividuen auf Grund verschiedener Wuchsformen,
Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft, Band 67, S. 410, 1954

KNAPP, R.:

Untersuchungen über den Einfluß verschiedener Baumarten auf die unter ihnen wachsenden Pflanzen,
Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft, Band 71, S. 411 - 421, 1958

KNAPP, R.:

Über die gegenseitige Beeinflussung von Pflanzenarten in Trockenrasen und Laubwäldern,
Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft, Band 72, S. 368 - 382, 1959

KNAPP, R.:

Kennzeichnung der sozialen Beziehungen und der Konkurrenzkraft der Pflanzen bei Vegetationsanalysen,
Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft, Band 73, S. 418, 1960

- KNAPP, R.: Die gegenseitige Beeinflussung von Pflanzen in natürlicher Vergesellschaftung, Angewandte Botanik, Band 34, Heft 3, S. 179 - 191, 1960
- KNAPP, R.: Die gegenseitige Beeinflussung von Pflanzen und ursprüngliche Struktur in Nadelwäldern am Beispiel nordamerikanischer Bestände, Berichte der oberhessischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde, Band 30, S. 74 - 99, 1960
- KNAPP, R.: Experimentelle Soziologie, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 1967
- KÖNIG, G.: Die Waldpflege aus der Natur und Erfahrung neu aufgefaßt, Verlag Becker, Gotha, 1849
- KÖSTLER, J. N.: Gemischte Wälder, Forstwissenschaftliches Centralblatt, Band 71, Heft 1/2, S. 1 - 17, 1952
- KÖSTLER, J. N.: Waldbauliche Beobachtungen an Wurzelstöcken sturmgeworfener Nadelbäume, Forstwissenschaftliches Centralblatt, Band 75, Heft 2, S. 65 - 91, 1956
- KÖSTLER, J. N.: Untersuchung zur Wurzelbildung, Allgemeine Forstzeitschrift, Band 17, Heft 413 - 417, 1962

KÖSTLER, J. N. und
SOMMER, H. G.:

Versuche zur Frage der Bodensanierung im
Forstamt Waldsassen,
Forstwissenschaftliches Centralblatt,
Band 81, Heft 7, S. 257 - 268, 1962

KÖSTLER, J. N.,
BRÜCKNER, E. und
BIBELRIETHER, H.:

Die Wurzeln der Waldbäume,
Paul Paul Parey - Verlag, Hamburg und Ber-
lin, 1968

KOVALEVA, A. N.:

Das Wurzelsystem von Holzpflanzen,
Botanische Zeitschrift, Band 22, Heft 5,
S. 421 - 426, 1962

KRAUSS, G.:

Die sogenannten Bodenerkrankungen,
Verlag Der Deutsche Forstwirt, Berlin, 1928

KRAUSS, G.,
WOBST, W. und
GÄRTNER, G.:

Humusaufgabe und Bodendurchwurzelung im
Eibenstocker Granitgebiet,
Tharandter Forstliches Jahrbuch, Band 85,
S. 290 - 370, 1934

KRUEDENER, v. A.:

Der unterirdische Wald,
Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Band 122,
S. 226 - 233, 1951

KREUTZER, K.:

Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudo-
gleyböden,
Forstwissenschaftliches Centralblatt,
Band 80, Heft 11, S. 356 - 392, 1961

- LADEFOGED, K.: Untersuchungen über die Periodizität in Ausbruch- und Längenwachstum der Wurzeln bei einigen unserer gewöhnlichsten Waldbäumen,
Det Forstlige Forsøgswæsen i Danmark,
Band 2, Heft 1, S. 1 - 222, 1939
- LAITAKARI, E.: The Root system of Pine - A morphological investigation,
Acta Forestalia Fennica, Band 33, Heft 1,
S. 1 - 380, 1927
- LEIBUNDGUT, H. und
KREUTZER, K.: Untersuchungen über die Wurzelkonkurrenz,
Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt
für das Forstliche Versuchswesen, Band 34,
Heft 5, S. 361 - 398, 1958
- LEIBUNDGUT, H.,
DAFIS, S., und
RICHARD, F.: Untersuchungen über das Wurzelwachstum verschiedener Baumarten,
Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen,
Band 114, Heft 11, S. 621 - 646, 1963
- LEIBUNDGUT, H.: Untersuchungen über die gegenseitige Beeinflussung verschiedener Baumarten,
Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen,
Band 127, Heft 11, S. 1 - 6, 1976
- LEMKE, K.: Untersuchungen über das Wurzelsystem der Roteiche auf diluvialen Standortsformen,
Archiv für Forstwesen, Band 5, Heft 1/2,
S. 8 - 45, 1956

- LIESE, J.: Beiträge zur Anatomie und Physiologie des
Wurzelholzes der Waldbäume,
Berichte der Deutschen Botanischen Gesell-
schaft, Band 38, S. 91 - 107, 1925
- LINNEMANN, G.: Beobachtungen über die Mykorrhizotypen
bei *Pseudotsuga*,
Allgemeine Forstzeitschrift, Band 14,
Heft 51, S. 882 - 885, 1959
- LINNEMANN, G.: Rassenunterschiede bei *Pseudotsuga Taxi-*
folia hinsichtlich der Mykorrhiza,
Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Band 131,
Heft 2, S. 41 - 47, 1960
- LINNEMANN, G.: Mykorrhiza und Düngung,
Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Band 135,
Heft 9, S. 228 - 233, 1964
- MAYER, H.: Waldbau,
Gustav Fischer - Verlag, Stuttgart - New
York, 1977
- McVEAN, D. N.: Ecology of *Alnus glutinosa*,
Journal of Ecology, Band 44, S. 219 - 225,
1956
- MELZER, E. W.: Die stochastischen Beziehungen zwischen
Sproß- und Wurzelsystem des Baumes,
Archiv für Forstwesen, Band 11, Heft 7,
S. 822 - 838, 1961

- MEYER, F. H.: Die Buchen- und Fichten-Mykorrhiza in verschiedenen Bodentypen, ihre Beeinflussung durch Mineraldünger sowie für die Mykorrhizabildung wichtige Faktoren, Verlag Wiedebusch, Hamburg, 1962
- MEYER, F. H.: Die Mykorrhizaausbildung an Buche und Fichte in Mull, Moder und Rohhumus, Internationales Mykorrhiza-Symposium in Weimar, Tagungsband S. 285 - 295, Gustav Fischer - Verlag, Jena, 1963
- MEYER, F. H.: Feinwurzelverteilung bei Waldbäumen in Abhängigkeit vom Substrat, Forstarchiv, Band 38, Heft 11/12, S. 286 - 290, 1967
- MITSCHERLICH, G.: Wald, Wachstum und Umwelt, Band I, J.D. Sauerlänger's Verlag, Frankfurt am Main, 1970
- MOLISCH, H.: Der Einfluß einer Pflanze auf die andere "Allelopathie", Gustav Fischer - Verlag, Jena, 1937
- MOLL, W.: Vergleichende Betrachtung von Feinwurzelintensität, Bodenanalyse und Nadelanalysen eines Standortes, BLV - Verlag, München, Basel, Wien, 1961

- MOOSMAYER, H. U.: Die ertragskundlich-standortskundliche Auswertung von Forsteinrichtungsgrundlagen, dargestellt am Beispiel der Nordwürttembergischen Fichtenbestände, Mitteilung des Vereins für forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung, Nr. 16, Habilitationsschrift der Nat. Math. Fakultät der Universität Freiburg, 1967
- MOROSOW, G. F.: Die Lehre vom Walde, Neumann Verlag, Radebeul und Berlin, 1959
- MÜLLER, S.: Die Wurzel der Fichte, Verlag Neumann, 1928
- NÄGELI, W.: Adventivwurzelbildung an übererdeten Baumstämmen, Mitteilung der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, Band 17, Heft 1, 1931
- NEUNHOFFER: Pflanzenfreundschaften - Pflanzenfeindschaften - Mischwald, Allgemeine Forstzeitschrift, Band 7, Heft 51/52, S. 547, 1952
- OKSBJERG, E. B.: Investigation of the distribution of Roots and Root competition for phosphate in stands of *Picea excelsa*, Oikos, Band 1, Heft 1, S. 57 - 76, 1958

- PRESTON, R. J.: The growth and development of rootsystems of juvenile Lodgepole pine, Ecology Monographs, Band 2, 1942
- PRIEHÄUSSER, G.: Bodenfrost, Bodenentwicklung und Flachwurzlichkeit der Fichte, Forstwissenschaftliches Centralblatt, Band 61, Heft 11, S. 329 - 341, 1939
- PRODAN, M.: Forstliche Biometrie, BLV - Verlagsgesellschaft, München, Bonn und Berlin, 1961
- PRODAN, M.: Holzmeßlehre, Sauerländer's Verlag, Frankfurt/M., 1965
- RACHTEJENKO, I. N.: Die Wurzelsysteme der Baum- und Straucharten, Goslesbumizdat Moskva, Leningrad, 1952
- REED, J. F.: Root and Shoot growth of Shortleaf and lobolly pines in relation to certain environmental conditions, Duke University School of Forestry, Bulletin No. 5, 1939
- RÜHRIG, E.: Die Anzucht von Forstpflanzen in Nadelstreubeeten, Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen, Band 22, Frankfurt/M, 1958

- RÖHRIG, E.: Über die gegenseitige Beeinflussung der höheren Pflanzen,
Sammelreferat aus der Sicht des Waldbaus,
Forstarchiv, Band 35, S. 25 - 39, 1964
- RÖHRIG, E.: Die Wurzelentwicklung der Waldbäume in Abhängigkeit von den ökologischen Verhältnissen,
Forstarchiv, Band 37, Heft 10/11,
S. 217 - 229 und 237 - 249, 1966
- SACHS, J.: Über das Wachstum der Haupt- und Nebenwurzeln,
Arbeit des Botanischen Instituts Würzburg,
1874
- SCHMIDT-VOGT, H.: Wachstum und Qualität von Forstpflanzen,
BLV - Verlag, München, Basel und Wien, 1966
- SCHMIDT-VOGT, H.: Wachstum und Wurzelentwicklung von Schwarzerlen verschiedener Herkünfte,
Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, Band 142,
Heft 6, S. 149 - 156, 1971
- SCHMIDT-VOGT, H.: Die Fichte,
Paul Parey - Verlag, Hamburg und Berlin,
1977
- SCHOCH, O.: Untersuchungen über Stockraumbewurzelung verschiedener Baumarten im Gebiet der Oberschwäbischen Fichtenreviere,
Veröffentlichung des Vereins für Standortkunde und Forstpflanzenzüchtung, Stuttgart,
1964

- SCHREIBER, M.: Beiträge zur Kenntnis des Wurzelsystems der Lärche und Fichte, Centralblatt für Forstwesen, Band 52, Heft 3/4, S. 78 - 103, 1926
- SCHUARMAN, J. J. und
GOEDEWAAGEN, M. A.: Methodes for the examination of Root Systems and Roots, Wageningen, 1965
- SCHULTZ, A. M. und
BISWELL, H. H.: A method for photographing Roots, Journal Forestry, Band 53, Heft 2, S. 138, 1955
- SUTTON, R. F.: Form and development of Conifer Roots Systems, Technical Communication No. 7, Commonwealth Forestry Bureau, Oxford, 1969
- TOLSKI, A. P.: Zur Frage des Einflusses des Bodentyps auf den Bau der Kiefernwurzeln, Arbeit der Versuchsreviere M. 2, Petersburg, 1904
- TORREY, G. und
CLARKSON, D. T.: The Development and Function of Root, Academic Press, London, New York, 1975
- VATER, H.: Die Bewurzelung der Kiefer, Fichte und Buche, Tharandter Forstliches Jahrbuch, Band 78, Heft 5, S. 65 - 85, 1927

- WAGENHOFF, A.: Untersuchungen über die Entwicklung des Wurzelsystems der Kiefer auf diluvialen Sandböden,
Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen,
Band 70, Heft 7, S. 449 - 496, 1938
- WAGENKNECHT, E.: Wurzeluntersuchung und ihre Bedeutung für standortsgerechten Waldbau,
Archiv für Forstwesen, Band 4, Heft 5/6,
S. 397 - 406, 1955
- WAGENKNECHT, E.: Beiträge zur Kenntnis der Wurzel Ausbildung verschiedener Bestockungen,
Mitteilung der Staatsforstverwaltung Bayerns, Heft 31, S. 252 - 274, 1966
- WEBER, H.: Die Bewurzelungsverhältnisse der Pflanzen,
Verlag Hermann Herder, 1953
- WELLER, F.: Die Ausbreitung der Pflanzenwurzeln im Boden in Abhängigkeit von genetischen und ökologischen Faktoren,
Arbeiten der Landwirtschaftlichen Hochschule Hohenheim, Band 32, Stuttgart, 1965
- WETTSTEIN, W. und
HOLZER, K.: Vergleichende Untersuchungen an Schwarzerle (*Alnus glutinosa*),
Zeitschrift für theoretische und angewandte Genetik, Band 28, S. 62 - 63, 1958
- WIEDEMANN, E.: Der Wurzelbau älterer Waldbäume,
Forstarchiv, Band 3, Heft 14, S. 229 - 233,
1927

- WIEDEMANN, E.: Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft,
Sauerländer's Verlag, Frankfurt/M, 1950
- WIELER, A.: Über die Periodizität der Wurzelbildung
der Pflanzen,
Forstwissenschaftliches Centralblatt,
Band 38, S. 333 - 349, 1894
- WILDE, S. A.,
VOIGT, G. K.,
WHITE, D. P. und
YOUNGBERG, C. T.: Characteristics of nursery stock relates
to its resistance against adverse environmental factors,
Veröffentlichung der Universität Wisconsin
Nr. 47, 1952
- WINSTON, J. B.: Biological Nitrogen Fixation,
Scientific American, Band 1, Heft 1,
S. 68 - 81, 1977
- ZETTEL, A.: Methodischer Vergleich der Baumwurzelerfassung
nach GROSSKOPF und BARNER, durchgeführt in Fichtenbeständen im Bereich verschiedener Standorteinheiten des nördlichen
Oberschwabens,
Dissertation der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität Freiburg i. Br.,
1971
- ZÖTTL, H. W.: Düngung und Feinwurzelverteilung in Fichtenbeständen,
Mitteilung der Staatsforstverwaltung
Bayerns, Band 34, S. 333 - 342, 1964

Lebenslauf

Am 1. Juli 1945 wurde ich in Bagdad/Irak als elftes Kind des Töpfers Saleim Al-Kawaz und dessen Ehefrau Nuniha, geb. Al-Hadad, geboren. Von 1952 bis 1958 besuchte ich die Volksschule und anschließend die Mittelschule und das Al-Sharkiyah-Gymnasium in Bagdad. Das Abitur legte ich im Jahre 1962/63 ab.

Von 1963 bis 1967 studierte ich Forstwissenschaften an der Universität Mosul im College of Agriculture and Forestry und bestand das Examen mit der Note "gut". Im Anschluß an mein Abschlußexamen arbeitete ich vom August 1967 bis 24. Dezember 1967 beim Forstamt Dialeh. Im Auftrag des Kultusministeriums unterrichtete ich anschließend ab 25. Dezember 1967 als Lehrer an der Agrar-Hochschule in Shatrah, danach in Diewanieh bis Ende April 1972.

Nachdem das Ministerium für Hochschulwesen und Wissenschaftliche Forschung mir ein Stipendium zu meiner weiteren beruflichen Ausbildung in Deutschland bewilligte, habe ich ab Mai 1972 zunächst die deutsche Sprache erlernt. Von 1972 bis 1975 studierte ich an der Universität Göttingen Forstwissenschaften. Dasselbst legte ich die Schlußprüfung ab und erhielt das Diplom als Diplomforstwirt im Jahre 1975.

Seit August 1975 arbeitete ich an meiner Dissertation unter Anleitung von Herrn Prof. Dr. Jörg Barner an der Forschungsstelle für Experimentelle Landschaftsökologie der Universität Freiburg. Nach meiner Promotion habe ich die Absicht, im Bereich des Ministeriums für Hochschulwesen und Wissenschaftliche Forschung im Irak tätig zu werden.

Seit 1969 bin ich mit Nada, geb. Al-Tabakchli, verheiratet und habe drei Kinder.

